



**Patrícia Isabel dos
Santos Vieira**

**Determinação dos erros de medição
associados ao Ensaio PMT.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Professor Nuno Bravo de Faria Cruz, Auxiliar convidado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e Dr. Manuel Bravo de Faria Cruz, Assistente do Departamento de Matemática do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

“O rumo, a Rosa dos Ventos,
Aponta-o no caminhar,
Procuramos novos tempos,
Queremos a vida achar,
Cada um é gota de água,
Juntos formamos a corrente,
Sonhando com um mundo sem
mágoa,
E um Homem diferente,
Somos Pioneiros! Procuramos,
descobrimos!
Somos Pioneiros! E um mundo
novo construímos!
Empunhamos a machada
Projectos a construir
Diante de nós a estrada
Nos chama para partir...

Baden Powell

Dedico este trabalho aos meus pais Lurdes e Carlos pelo apoio e carinho que sempre me deram. Pelos ensinamentos, por serem maravilhosos e por me terem proporcionado sempre todas as oportunidades na vida.

o júri

presidente

Prof. Jorge Manuel Pessoa Girão Medina
professor auxiliar do Departamento de Geociências
Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Carlos Manuel Gonçalves Rodrigues
professor adjunto do Instituto Politécnico da Guarda

Prof. Nuno Bravo de Faria Cruz
professor auxiliar convidado do Departamento de Geociências
Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

porque este trabalho se deve também ao apoio de pessoas que tenho a sorte de ter na minha vida, gostaria de deixar os meus agradecimentos:

ao Professor Nuno Cruz, (porque sem ele nada teria sido possível), pela oportunidade de trabalhar neste tema de investigação, pela oportunidade de trabalhar do seu lado, pelo conhecimento que me transmite, por acreditar que conseguiria, por levar a vida com um sorriso no rosto e por ser uma das pessoas mais fantásticas que tive o prazer de conhecer.

ao Doutor Manuel Cruz, pela orientação matemática, por me ter ajudado a superar as dificuldades, pelos seus ensinamentos e por ter tornado o meu percurso mais pacífico com a sua boa disposição.

à Cárin, que mesmo sem me conhecer me recebeu com grande carinho, que me apoio em tudo, que esteve sempre pacientemente do meu lado, que me acalmou quando estava mais nervosa, que se tornou uma amiga, e que fez dos momentos de trabalho também momentos de descontração, facilitando todo o processo e contribuindo para o seu resultado final: Obrigado, é muito bom ter conhecido alguém como tu e deixo aqui a promessa de que retribuirei sempre a dedicação.

aos meus colegas de trabalho da Mota-Engil, que directa ou indirectamente contribuíram para a sua realização, e presenciaram todos os momentos que passei a elaborá-lo. Em especial ao Mike, ao Leonel e ao Francisco que tiveram sempre uma palavra amiga quando precisei.

ao Jorgito e ao Tiaguinho, os meus amigos de curso que me acompanharam no meu percurso académico, sempre com companheirismo, amizade e muito boa disposição.

à São e à Joana, que desde a minha infância estão do meu lado, a presenciar todas as etapas da minha vida, e mesmo de longe me fazem sentir que estão sempre do meu lado.

aos meus amiguinhos dos escuteiros com quem vivi alguns dos meus melhores momentos durante os anos que passamos juntos.

aos meus pais, Lurdes e Carlos, pois a eles devo tudo o que sou, por estarem sempre comigo e me apoiarem incondicionalmente em todas as situações, por serem os melhores pais do mundo, por me terem transmitido os valores em que acredito, por me terem mostrado que quando nos esforçamos conseguimos e por deles ter herdado a boa disposição com que encaro tudo na vida.

aos meus avós, Glória e Joaquim, pelo seu amor, carinho e incentivo em todas as fases da minha vida.

a todos vós, o meu sincero obrigado por estarem sempre comigo!

palavras-chave

pressiómetro de Ménard, aproximação do majorante do erro, erro absoluto, erro relativo, precisão

resumo

o dimensionamento de estruturas em engenharia tem a sua base assente no cálculo. Como tal torna-se fundamental o conhecimento da eficiência e da qualidade dos resultados. A obtenção dos parâmetros geotécnicos utilizados é baseada em ensaios in situ, e o seu cálculo depende da qualidade dos equipamentos de medição, da adequabilidade a cada situação e dos erros associados a cada um dos parâmetros.

a dissertação apresentada baseia-se na análise de sensibilidade dos equipamentos de medição do ensaio Pressiómetro de Ménard, PMT a fim de verificar a qualidade da precisão associada e suas consequências no cálculo dos parâmetros geotécnicos de caracterização de maciços.

keywords

Ménard Pressuremeter, bringing the majorante of error, absolute error, relative error, precision, accuracy

abstract

the size of structures in engineering has its basis based on the calculation. As such it is fundamental knowledge of the efficiency and quality of results. The attainment of the geotechnical parameters used is based on testing in situ, and its calculation depends on the quality of measuring equipment, the adequacy of each situation and the errors associated with each of the parameters. the graduation work presented is based on the analysis of sensitivity of measuring equipment for the pressuremeter test, PMT to verify the quality of precision and their associated consequences in the calculation of geotechnical parameters for the characterization of soils.

ÍNDICE GERAL

Índice Geral.....	ix
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tabelas.....	xv
Simbologia.....	xvii
1. Formação dos solos	1
1.1. Ciclo Geológico.....	2
1.1.1. Ciclo Hidrológico	2
1.1.2. Ciclo Litológico	3
1.1.3. Ciclo Tectónico.....	5
1.2. Processo Sedimentar.....	6
1.2.1. Meteorização.....	6
1.2.1.1. Meteorização Física	9
1.2.1.2. Meteorização Química	9
1.2.2. Erosão e Transporte	11
1.3. Definição de solo ou maciço terroso. Classificação quanto à origem.....	14
2. Parâmetros mecânicos	19
2.1. Estado e história de tensões.....	19
2.2. Parâmetros de Resistência.....	22
2.3. Parâmetros de Deformabilidade.....	24
3. Pressiómetro de Ménard.....	29
3.1. Introdução	29
3.2. Equipamento.....	32
3.3. Perturbações na realização do ensaio.....	37
3.4. Vantagens e desvantagens do pressiómetro de Ménard	40
3.5. Execução do ensaio.....	41
3.5.1. Calibração	45
3.5.2. Correção da Curva	48
3.6. Parâmetros e correlações do ensaio PMT.....	50
3.6.1. Parâmetros de ensaio	50
3.7. Identificação do tipo de solo através de parâmetros pressiométricos.	64
3.7.1. Aplicações do pressiómetro de Ménard em projectos de Fundações Superficiais	64

4.	Precisão nas medições.....	71
4.1.	Introdução	71
4.2.	Estimativa de erros	72
4.3.	Tipos de Erro	73
4.3.1.	Erros Grosseiros	73
4.3.2.	Erros Sistemáticos	74
4.3.3.	Erros Acidentais ou Aleatórios	74
4.3.4.	Outros Erros	74
4.4.	Erros no ensaio PMT	75
4.4.1.	Precisão do equipamento	76
4.4.1.1.	Precisão dos manómetros e volumímetros	76
4.4.1.1.	Precisão nas medições de profundidade	78
4.4.2.	Procedimentos no ensaio.....	78
4.4.3.	Processamento das leituras.....	79
5.	Modelo analítico.....	81
5.1.	Erro Relativo e Erro Absoluto	81
5.2.	Modelação numérica.....	82
5.2.1.	Problema Fundamental da Teoria de Erros	82
5.3.	Análise Estatística.....	83
5.3.1.	Shapiro Francia.....	84
5.3.2.	Testes paramétricos.....	84
5.3.3.	Testes não paramétricos.....	85
5.4.	Considerações	85
6.	Apresentação e análise de resultados.....	87
6.1.	Enquadramento dos solos ensaiados.....	87
6.2.	Distribuição das medições	92
6.2.1.	Solos Lodosos.....	93
6.2.2.	Solos Sedimentares Argilosos	93
6.2.3.	Solos Sedimentares Argilo-Siltosos	94
6.2.4.	Solos Sedimentares Arenosos	94
6.2.5.	Solos Residuais Graníticos	95
6.3.	Precisões dos parâmetros de entrada	97
6.4.	Dados de Saída	97

6.5.	Análise da propagação de erros	98
6.5.1.	Parâmetros Básicos de Ensaio	98
6.5.2.	Parâmetros Geotécnicos.....	100
6.6.	Estudo da influência das leituras de pressão e volume no Módulo de Ménard.....	102
6.7.	Análise Estatística.....	102
6.7.1.	Parâmetros de Ensaio.....	105
6.7.2.	Parâmetros Geotécnicos.....	107
6.8.	Evolução do erro relativo médio com diferentes ordens de grandeza de precisão das leituras manométricas e volumétricas	112
6.8.1.	Parâmetros Básicos	113
6.8.1.1.	Pressão Inicial.....	113
6.8.1.2.	Pressão Fluência	114
6.8.1.3.	Pressão Limite	115
6.8.1.4.	Módulo Pressiométrico de Ménard.....	116
6.8.2.	Parâmetros Geotécnicos.....	117
6.8.2.1.	Coesão não drenada.....	117
6.8.2.2.	Ângulo de Atrito e Dilatância	119
6.8.2.3.	Módulo de Distorção módulo de Young	120
6.8.3.	Observações	122
7.	Análise propagação de erros. Comparação PMT/DMT	123
7.1.	Breve Introdução ao Dilatômetro de Marchetti	123
7.1.1.	Parâmetros de ensaio	123
7.1.2.	Parâmetros Geotécnicos.....	124
7.2.	Erro Relativo (%) PMT vs DMT	126
7.2.1.	Resumo de resultados	126
8.	Conclusões	129
	Considerações finais.....	133
	Referências Bibliográficas	135
	ANEXO.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - O ciclo hidrológico (Press et al., 1997).....	3
Figura 2 - O ciclo litológico simplificado (Press et al., 1997)	4
Figura 3 - Ilustração do ciclo tectónico. Orogenia, subsidência, metamorfismo (José F. Vigil. USGS,2000)	6
Figura 4 - Processo de formação de um solo a partir de uma rocha sã.....	7
Figura 5 - As séries de Goldish referem a estabilidade relativa de alguns minerais comuns em comparação com as séries reaccionais de Bowen (Adaptado de Press, F. & Siever, R., 1997). 8	
Figura 6 - Queda de rochas por acção da gravidade (Adaptado de Press, F. & Siever, R. 1997).	12
Figura 7 - Etapas da formação de um pavimento desértico. Adaptado de Press, F. & Siever, R. (1997)	14
Figura 8- Perfil típico de um maciço rochoso com zona superficial alterada e com solos residuais (Little, 1996).....	15
Figura 9 - Solos residuais em função do tipo de rocha (Chiossi, 1979).	16
Figura 10 - Perfil de meteorização em rochas ígneas e metamórficas (Deere e Patton, 1971). 16	
Figura 11 - Cálculo de tensões totais e efectivas num maciço terroso.....	21
Figura 12 Determinação dos parâmetros de resistência através da envolvente de Mohr (Matos Fernandes, 2006).	23
Figura 13 - Envolvente de Mohr em tensões totais de uma argila – resistência não drenada (Matos Fernandes, 2006).	24
Figura 14 - Aplicação dos ensaios de campo (Lunne et al. 1997).....	31
Figura 15- Sonda Auto-perfuradora (Cavalcante, 1997).....	33
Figura 16 - Ilustração do cone-pressiómetro (Lunne et. al. 1997)	34
Figura 17 - Ilustração dos elementos constituintes do pressiómetro de Ménard (Schnaid, 2000)	35
Figura 18 - Foto do Pressiómetro de Ménard (Rodrigues, 2003)	35
Figura 19 - Pormenores da sonda pressiométrica (Rodrigues, 2003).....	36
Figura 20 - Efeito do comprimento da sonda na expansão da cavidade (Baguelin et al. (1978)38	
Figura 21 - Inserção da sonda no furo	39
Figura 22 - Diferentes formas de curvas pressiométricas obtidas em função da qualidade do furo (ASTM D4719 – 1987)	40
Figura 23 - Execução de um furo para realização do ensaio PMT em solos Lodosos.....	42
Figura 24 - Fases de uma curva pressiométrica ideal do ensaio Ménard (Sandroni e Brandt, 1983)	44
Figura 25 - Curva de fluência (Baguelin et al 1978)	45
Figura 26 -Procedimentos para calibração da sonda: correcção do volume (Rodrigues, 2003) 47	
Figura 27 - Procedimentos para calibração da sonda: correcção da pressão (Rodrigues, 2003)	47
Figura 28 - Curvas de calibração da perda de volume e pressão (ASTM D4719-1987).....	48
Figura 29 - Correcção da altura piezométrica (Rodrigues, 2003).....	49

Figura 30 - Método de Estimativa da Pressão limite.....	52
Figura 31 - Curva pressiométrica corrigida (ASTM D4719-1987; NF P94-110 1991)	54
Figura 32 - Determinação do módulo inicial tangente da curva pressão/ expansão da cavidade (Mair e Wood, 1987).....	56
Figura 33 - Comportamento da coesão não drenada com a deformação (Mair e Wood, 1987) 59	
Figura 34 - Cálculo da coesão não drenada pelo declive da curva $P \times \ln (\Delta V/V)$ (Mair e Wood, 1987)	60
Figura 35 - Representação da expansão da cavidade cilíndrica.	62
Figura 36 - Curva $\ln (P-u_0) / \ln \epsilon_c$	63
Figura 37 - Valores do Coeficiente de capacidade de K_g para fundações superficiais. (Ménard, 1963)	66
Figura 38- Gráfico para determinação de λ_d e λ_c (Ménard, 1975).....	68
Figura 39 - Divisão do solo em camadas de modo a calcular o módulo E (Sols Soils, 1975)....	69
Figura 40 - Módulo pressiométrico para cálculo de assentamentos (Sols Soils, 1975)	69
Figura 41 - Manómetros de Pressão do Pressiómetro	77
Figura 42 - Escala de leitura de volumes do Pressiómetro	77
Figura 43 - Posição do operador em relação ao aparelho.....	78
Figura 44 - Registo de campo	79
Figura 45 - Extracto da carta geológica do concelho de Lisboa – Alcântara.....	87
Figura 46 - Extracto da carta geológica de Tavira.	88
Figura 47 - Extracto da carta geológica de Portimão.....	89
Figura 48 - Extracto da carta geológica de Lisboa – Buraca-Pontinha.....	90
Figura 49 - Extracto da carta geológica do Porto.....	91
Figura 50 - Evolução do erro relativo em função do tipo de solo (%). Parâmetros de Ensaio. ...	99
Figura 51 - Evolução do erro relativo em função do tipo de solo. Parâmetros Geotécnicos....	101
Figura 52 - Distribuição de dados por tipo de solo.....	103
Figura 53 - Avaliação visual do tipo de distribuição e simetria de cada um dos parâmetros através de “boxplot”	104
Figura 54 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros de ensaio	106
Figura 55 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros geotécnicos G_a , G_g	108
Figura 56 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros geotécnicos Φ e ψ	109
Figura 57 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros geotécnicos Cu_{Pico} e Cu_{Resid}	110
Figura 58 - Gráficos de erro relativo médio da pressão inicial.....	113
Figura 59 - Gráficos de erro relativo médio da pressão de fluência	114
Figura 60 - Gráficos de erro relativo médio da pressão limite	115
Figura 61 - Gráficos de erro relativo médio do módulo Pressiométrico de Ménard	116

Figura 62 - Gráficos de erro relativo médio da coesão não drenada de pico	117
Figura 63 - Gráficos de erro relativo médio da coesão não drenada residual.....	118
Figura 64 - Gráficos de erro relativo médio do ângulo de atrito e dilatância	119
Figura 65 - Gráficos de erro relativo médio do módulo de Distorção	120
Figura 66 - Gráficos de erro relativo médio do módulo de Distorção Analítico e de Young	121
Figura 67 - Diagrama de consulta do peso volúmico (Mateus, 2008).	124
Figura 68 – Comparação Erros Relativos Médios nos parâmetros dos ensaios DMT e PMT.	127

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de solos argilosos quanto ao grau de sobreconsolidação (Matos Fernandes, 2006)	22
Tabela 2 - Sondas Pressiométricas normalizadas (Cestari, 1990).....	37
Tabela 3 - Tabela para estimativa da pressão limite do solo (Briaud, 1992).....	43
Tabela 4 - Determinação do parâmetro α_p , factores reológicos para vários tipos de solo. (adaptado de Clarke, 1995).....	58
Tabela 5 - Relação entre E_{PMT} e E_{OD} para solos normalmente consolidados (Ménard & Rousseau 1962). $E_{oed} = E_{PMT}/\alpha$	58
Tabela 6 - Relação entre PL e C_u em argilas (Amar & Jézéquel 1972)	60
Tabela 7 - Valores indicativos dos ângulos de atrito de pico e volume constante de solos granulares.....	61
Tabela 8 - Valores típicos de E_{PMT} e P_L e da relação E_{PMT}/P_L para vários tipos de solo (Ménard, 1975)	64
Tabela 9 - Classificação do solo em categorias segundo Ménard (1975).	66
Tabela 10 - Coeficiente de Capacidade de Carga Kg para fundações profundas (Vesic, 1975).	66
Tabela 11 - Tabela 1. Factor forma segundo Baguelin et al. (1986)	68
Tabela 12 - Exemplos de leituras e erros associados	72
Tabela 13 - Erros de Medição e Erros de Fabrico	73
Tabela 14 - Perturbações no ensaio pressiométrico de Ménard (Orchant et al, 1988).....	76
Tabela 15 - Relação E_{PMT}/P_L dos valores obtidos e sua classificação.	92
Tabela 16 - Distribuição das leituras consideradas	92
Tabela 17 - Distribuição das Leituras Grupo A- Solos Lodosos	93
Tabela 18 - Distribuição das Leituras Grupo B- Sedimentar Argiloso	93
Tabela 19 - Distribuição das Leituras Grupo C- Sedimentar Argilo-Siltoso.....	94
Tabela 20 - Distribuição das Leituras Grupo D – Sedimentar Arenoso.....	95
Tabela 21 - Distribuição das Leituras Grupo E- Solo Residual Granítico	96
Tabela 22 - Valores de erro absoluto máximo associados às grandezas medidas.....	97
Tabela 23 - Valores de erro absoluto máximo associados às constantes utilizadas.....	97
Tabela 24 - Intervalos do erro relativo dos parâmetros básicos do ensaio PMT (%).	98
Tabela 25 - Exemplo da evolução do erro relativo com a profundidade no P_0	100
Tabela 26 - Intervalos do erro relativo dos parâmetros geotécnicos do ensaio PMT (%).	100
Tabela 27 - Resultados das derivadas parciais associados a cada parâmetro da fórmula matemática para o cálculo do E_{PMT}	102
Tabela 28 - Interpretação da análise estatística de P_F e E_{PMT} (Figura 54).	107
Tabela 29 - Interpretação da análise estatística de P_L (Figura 54).....	107
Tabela 30 - Interpretação da análise estatística do E , G_a e G_g (Figura 55).....	111
Tabela 31 - Interpretação da análise estatística do ψ e Φ (Figura 56).....	111
Tabela 32 - Interpretação da análise estatística de C_{uPico} e C_{uResid} (Figura 57).....	112

Tabela 33 - Precisões consideradas na análise da propagação do erro.....	112
Tabela 34 - Parâmetros Básicos de Ensaio DMT (Mateus, 2008).....	123
Tabela 35 - Parâmetros Intermédios DMT (Mateus, 2008)	123
Tabela 36 - Estado de tensão “in situ”, k_0	125
Tabela 37 - Grau de sobreconsolidação, OCR.....	125
Tabela 38 - Coesão efectiva e ângulo de resistência ao corte em solos residuais	125
Tabela 39 - Módulo de deformabilidade, M.....	125
Tabela 40 - Módulo de Distorsional, G_0	125
Tabela 41 - DMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Básicos (%). (Mateus, 2008) ..	126
Tabela 42 - DMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Geotécnicos (%). (Mateus,2008)	126
Tabela 43 - PMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Básicos (%)......	127
Tabela 44 - PMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Geotécnicos (%).	127

SIMBOLOGIA

Ao longo deste trabalho, sempre que surgiu uma nova simbologia, o seu significado foi definido no texto de forma a não suscitar dúvidas. No entanto, foi elaborada uma listagem dos mais importantes. De notar que a adopção da simbologia utilizada pelos vários autores conduziria à coincidência dos mesmos símbolos para designar grandezas diferentes.

Alfabeto Latino

a	– coeficiente de compressibilidade do sistema ($\Delta V/\Delta P$) em cm^3/kPa
A	– pressão inicial no ensaio DMT
B_{DMT}	– pressão final de carga no ensaio DMT
B	– largura de fundação (m)
B_0	– largura do pressiómetro
C	– pressão de descarga no ensaio DMT
c	– coesão
c'	– coesão efectiva
c_u	– coesão não drenada
cm	– centímetros
D_i	– diâmetro interno do tubo de calibração
E	– módulo de elasticidade ou módulo de Young
E_{PMT}	– módulo pressiométrico
E_{oed}	– módulo edométrico
G_a	– módulo de distorção (método analítico)
G_g	– módulo de distorção (método gráfico)
I_D	– índice de material
K_g	– coeficiente de capacidade de carga
K_0	– coeficientes de impulso em repouso
K_D	– índice de tensão horizontal (DMT)
L_0	– comprimento da sonda

M	– módulo de deformabilidade confinada
M_{DMT}	– módulo de deformabilidade confinado deduzido a partir do DMT
m	– metros
mm	– milímetros
P_0	– pressão correspondente a A corrigida da rigidez da membrana
P_1	– pressão correspondente a B corrigida da rigidez da membrana
P_2	– pressão correspondente a C corrigida da rigidez da membrana
P_0	– pressão inicial
P_F	– pressão de fluência
P_L	– pressão limite
P_m	– pressão lida no manómetro da unidade de controlo
q	– capacidade de carga
r_0	– raio da sonda
r_i	– raio do cilindro no volume inicial.
s	– assentamento (m)
U_D	– índice de tensão neutra
u_0	– tensão neutra
V	- volume da cavidade
V_c	-volume devido às perdas com o sistema de compressibilidade
V_s	– volume inicial da sonda
V_0	– volume necessário para expandir a sonda até as paredes do furo
z	– profundidade
z_w	– profundidade do nível freático

Alfabeto Grego

δ	– erro absoluto
ε	– Expansão da cavidade
ϕ	– ângulo de atrito
ϕ'	– ângulo de atrito efectivo
Φ_{cv}	– ângulo de atrito a volume constante
γ	– peso volúmico do solo
γ_w	– peso específico da água
φ	– ângulo de dilatação do solo
ν	– coeficiente de Poisson
ρ	– densidade
σ	– tensão normal efectiva ou total
σ'_h	– tensão efectiva horizontal
σ_{h0}	– tensão total horizontal de repouso
σ_v	– tensão vertical total
σ'_v	– tensão efectiva vertical
σ'_p	– tensão de pré consolidação
τ	– tensão de cisalhamento ou tangencial
ς	– erro relativo

Abreviaturas

- DMT – Marchetti Dilatometer Test
- PBP Pre Boring Pressuremeter
- PIP – Push in Pressuremeter
- PMT - Ménard Pressuremeter Test
- SBP – Self Boring Pressuremeter
- OCR – Over Consolidated Ratio

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O trabalho apresentado tem como objectivo enunciar e discutir a propagação do erro de leitura com o ensaio Pressiómetro de Ménard, assim como o seu efeito através das expressões utilizadas para o cálculo dos parâmetros essenciais utilizados em geotecnia.

A base da engenharia está no cálculo, assim torna-se cada vez mais necessário rigor no dimensionamento de estruturas e compreensão da mecânica das rochas e solos de forma a obter parâmetros mais correctos e resultados mais precisos.

O grau de fiabilidade dos parâmetros pode ser avaliado pela precisão das leituras efectuadas em ensaios *in situ* e pelo estudo da propagação dos seus erros associados ao longo das expressões matemáticas utilizadas.

Com base nesses conceitos, o trabalho a apresentar tem a seguinte divisão:

No Capítulo 1, Formação de Solos, onde é descrito de forma resumida o processo de formação dos solos e os ciclos envolvidos.

No Capítulo 2, Parâmetros Mecânicos, onde são apresentados de forma breve os principais conceitos de resistência e deformabilidade de solos.

No Capítulo 3, Pressiómetro de Ménard, este capítulo introduz o conceito do ensaio, equipamento, execução, aplicações, parâmetros e correlações.

No Capítulo 4, Precisão nas medições, expõe-se uma introdução teórica aos tipos de erros associados à execução de experiências, salientando quais os erros que podem ocorrer com um ensaio PMT.

No Capítulo 5, Modelo Analítico, é resumida a base matemática utilizada no estudo da propagação dos erros de medição em função da precisão do equipamento, assim como o seu conceito teórico.

No Capítulo 6, Apresentação e análise de resultados, são apresentados os dados resumo obtidos com o software utilizado, a partir dos quais se obtiveram os gráficos e tabelas com os parâmetros e o seu erro resultante em função do tipo de solo.

No Capítulo 7, Análise da propagação de erros. Comparação PMT/DMT, são discutidos e comparados os valores resultantes de ambos os ensaios.

Por último no Capítulo 8, Conclusões onde são salientadas as questões de maior interesse.

Capítulo 1.

FORMAÇÃO DOS SOLOS

1. FORMAÇÃO DOS SOLOS

A mecânica dos solos utiliza várias propriedades características dos solos, avaliadas através de ensaios laboratoriais executados sobre amostras de solos ou ensaios *in situ*. Nos problemas ideais as grandes massas de solo são consideradas homogêneas para que as suas propriedades físicas em qualquer ponto dessa massa sejam idênticas àquelas determinadas em laboratório com apenas algumas amostras representativas do terreno. Como infelizmente os solos resultam de processos naturais complexos esse processo não pode ser considerado verdadeiro, dado que na sua maioria os solos naturais são heterogêneos.

Assim para avaliar de forma correcta as propriedades de um solo a partir de ensaios laboratoriais é fundamental considerar um certo número de amostras e dominar os processos responsáveis pela formação de um maciço terroso assim como a sua influência nas suas propriedades.

Os solos têm origem em maciços rochosos pré-existentes que constituem a rocha mãe que por sua vez é submetida a condições ambientais responsáveis pela erosão a nível físico, químico e biológico.

O planeta Terra funciona como um sistema interactivo de massa e energia que gera vulcões, glaciares, montanhas, planícies, continentes e oceanos. A matéria da Terra (rochas e seus minerais) e a sua estrutura são relíquias da dinâmica evolutiva do sistema ao longo do tempo Geológico.

As suas paisagens naturais são modeladas por rios, glaciares, pelo vento e pela água subterrânea criando maravilhas da natureza. O nosso ambiente através da construção de núcleos habitacionais, do corte de valas para a construção de estradas e do redireccionamento dos cursos de água altera todo este sistema. Porém a existência humana depende dos processos geológicos básicos que governam a dinâmica da superfície terrestre e dos vastos reservatórios de água que cobrem a maior parte do planeta.

A dinâmica da Terra é controlada pelo Sol, cuja energia conduz a atmosfera e os oceanos num complexo padrão que produz o clima e transporta a água por todo o globo. Os processos da superfície resultam da interacção do sol com o calor interno da

Terra, a qual é responsável pelo movimento das placas tectónicas e aparecimento de cadeias montanhosas.

1.1. Ciclo Geológico

No interior profundo da Terra geram-se os constituintes da crosta terrestre, assim como as forças que a deformam. Estas forças tectónicas geradas pela energia proporcionada pelo calor interno da Terra criam placas tectónicas e mantêm-nas em movimento.

A Terra é um planeta geologicamente activo. A geodinâmica externa é, essencialmente, alimentada pelo Sol, enquanto a interna tem como principal motor a geotermia, que acciona os movimentos de convecção e, em consequência os movimentos das placas litosféricas.

As erupções vulcânicas e os sismos são a consequência dos efeitos deste processo, assim como as imponentes cadeias montanhosas. Através do estudo da tectónica de placas, dos sismos, dos vulcões e deformações da crosta terrestre, os geólogos podem inferir acerca das propriedades do interior profundo do planeta Terra.

As forças responsáveis por todos estes processos, tanto internas como externas operam como tantas outras, em ciclos. Todos eles no seu conjunto constituem o ciclo geológico: ciclo hidrológico, ciclo litológico e o ciclo tectónico.

1.1.1. Ciclo Hidrológico

Cada um dos ambientes nos quais a água é armazenada constitui um reservatório. Na natureza, os principais reservatórios são os oceanos, os glaciares e o gelo polar, as águas subterrâneas, os lagos, os rios, a atmosfera e a biosfera.

A distribuição da água entre os seus reservatórios é ilustrada pela Figura 1 O reservatório continental inclui os lagos, os rios, a água subterrânea e os oceanos são de longe o maior reservatório. Mesmo que os reservatórios dos rios e lagos sejam relativamente pequenos, são importantes para a população humana pois contêm água doce. A quantidade de água subterrânea é 100vezes maior que a água dos rios e lagos mas grande parte não pode ser utilizada, pois contem uma grande parte de material dissolvido. Os reservatórios podem receber e ceder água, como são exemplo a precipitação e a evaporação respectivamente. Se a recepção e a cedência forem

iguais, o tamanho do reservatório permanece inalterado ainda que a água esteja constantemente a entrar e a sair.

A água da superfície ou subterrânea move-se ciclicamente entre os principais reservatórios: oceanos, atmosfera e os continentes. Passa dos oceanos para a atmosfera por evaporação, precipitando-se sobre os continentes e oceanos, e através da escorrência superficial para os cursos de água, voltando por sua vez para o oceano. Este fluxo contínuo de movimento de água constitui o ciclo hidrológico, ciclo este que actua como um importante agente modelador da Terra devido à capacidade de erosão, transporte e deposição de sedimentos por via hidráulica. A existência de água nos 3 estados (líquido, sólido e gasoso) faz com que exista um movimento contínuo nos processos de transição de um ciclo para o outro.

O transporte de água evaporada dos oceanos é equilibrado pela precipitação sobre os continentes. A evaporação dos oceanos é equilibrada pela escorrência superficial e pela precipitação sobre os oceanos.

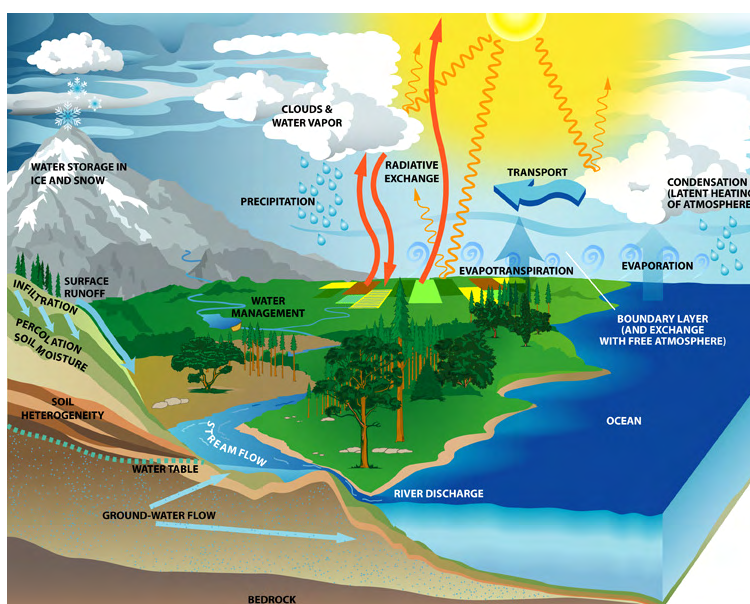


Figura 1 - O ciclo hidrológico (Press et al., 1997).

1.1.2. Ciclo Litológico

O conjunto de transformações do material rochoso no decurso das quais as rochas são geradas, destruídas e alteradas por processos devidos à dinâmica interna e à dinâmica externa da Terra constitui o ciclo das rochas ou ciclo litológico.

O ciclo litológico engloba um conjunto de processos geológicos pelos quais os três grandes tipos de rocha (ígneas, sedimentar ou metamórfica) se formam.

Todo este processo tem origem no magma no interior da Terra, onde as temperaturas e pressões são elevadas tornando possível a fusão de qualquer tipo de rocha pré-existente (Figura 2).

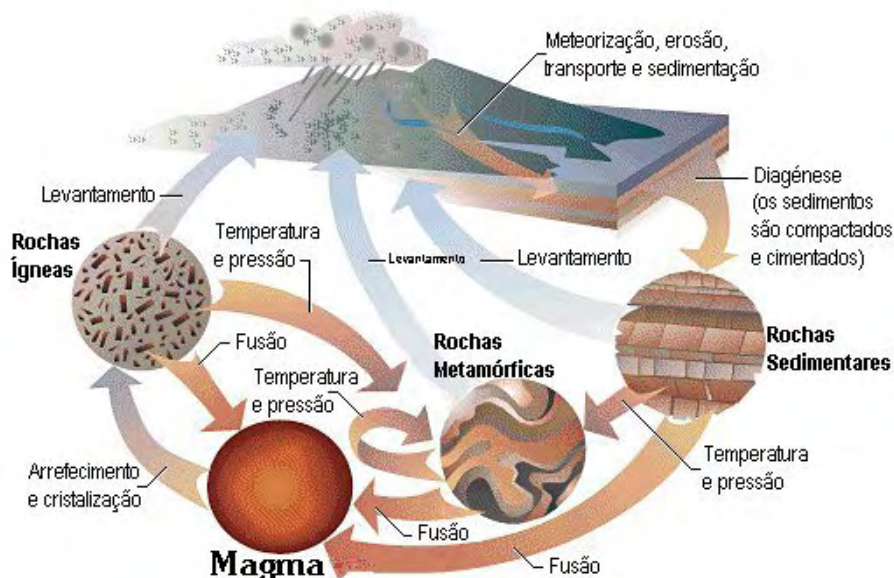


Figura 2 - O ciclo litológico simplificado (Press et al., 1997)

Hutton denominou todo este processo por plutónico (de Plutão, o Deus Romano do mundo inferior) e assim todas as rochas ígneas intrusivas são plutónicas e todas as rochas ígneas extrusivas são vulcânicas (de Vulcano, o Deus grego do fogo).

À medida que se dá a fusão das rochas pré-existentes, todos os componentes minerais que as constituem são destruídos e os seus elementos químicos homogeneizados nos líquidos resultantes. Quando o magma arrefece, os cristais de novos minerais desenvolvem-se formando rochas magmáticas.

O processo de orogenia resulta da ascensão do material de fusão de rochas ígneas, rochas sedimentares e metamórficas, nas fronteiras de placas tectónicas convergentes formando elevadas cordilheiras montanhosas, tornando a crosta terrestre enrugada e deformada.

Após o processo de elevação, as rochas da crosta sobrejacentes às rochas ígneas ficam expostas à meteorização gradual pelos agentes erosivos, originando material solto que a erosão retira expondo as rochas ígneas à superfície. Estas, agora num ambiente mais frio e húmido, longe do seu local de origem no interior quente da Terra,

meteorizam e os seus minerais experimentam alterações químicas. Os minerais de ferro podem sofrer oxidação, os minerais de alta temperatura como os feldspatos podem transformar-se em minerais de baixa temperatura como a argila, e algumas substâncias, tais como as piroxenas podem dissolver-se a medida que ficam expostas à precipitação. Este processo de erosão depende do tipo de rocha e dos seus minerais constituintes e da forma como reagem aos agentes erosivos e às diversas condições ambientais.

A meteorização da rocha ígnea produz fragmentos rochosos de variados tamanhos e tipos que são levados pela erosão e os seus agentes (água ou vento). Alguns são transportados por cursos de água até aos rios e por fim até aos oceanos, onde se depositam e formam estratos de argila, silte, areia e outros sedimentos formados por material dissolvido. O afundimento destes sedimentos faz com que litifiquem gradualmente formando uma rocha sedimentar. Quando a rocha sedimentar é afundada torna-se mais quente e com o aumento da pressão e temperaturas em profundidade faz com que os minerais presentes na rocha sedimentar sólida sofram um processo de metamorfismo, o qual transforma as anteriores em rochas metamórficas.

Continuando o aquecimento pode dar-se a fusão e a formação de um novo magma a partir do qual as rochas ígneas irão cristalizar começando um novo ciclo.

O ciclo litológico é eterno e complexo, está sempre sujeito a diferentes fases em diferentes partes da crosta, formando e erodindo montanhas num lugar e depositando e afundando sedimentos noutro. As rochas que constituem a Terra sólida são continuamente recicladas, apenas podemos presenciar as suas alterações à superfície, tudo o que acontece em profundidade é deduzido através de provas indirectas.

1.1.3. Ciclo Tectónico

O ciclo tectónico (Figura 3) é um sub-ciclo do ciclo litológico que se inicia com o afundimento e subsidência dos sedimentos resultantes dos processos de erosão, seguido pela sua compressão, dobramento, falhamento e metamorfismo finalizando com a formação de cadeias montanhosas e a erosão que proporciona a origem de novos sedimentos reiniciando todo o processo.

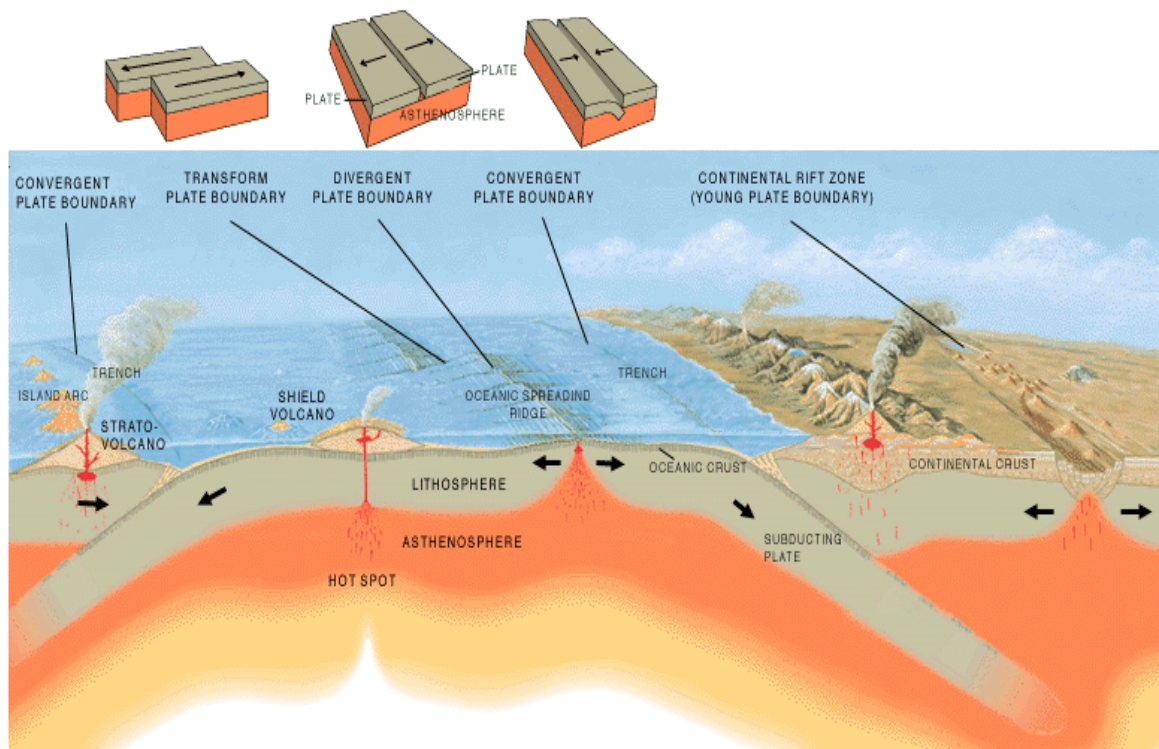


Figura 3 - Ilustração do ciclo tectônico. Orogenia, subsidência, metamorfismo (José F. Vigil. USGS,2000)

1.2. Processo Sedimentar

1.2.1. Meteorização

A meteorização é o processo natural de decomposição ou desintegração de rochas e solos, e seus minerais constituintes, por acção dos efeitos químicos, físicos e biológicos que resultam da sua exposição aos factores ambientais (Figura 4 - Processo de formação de um solo a partir de uma rocha sã.)

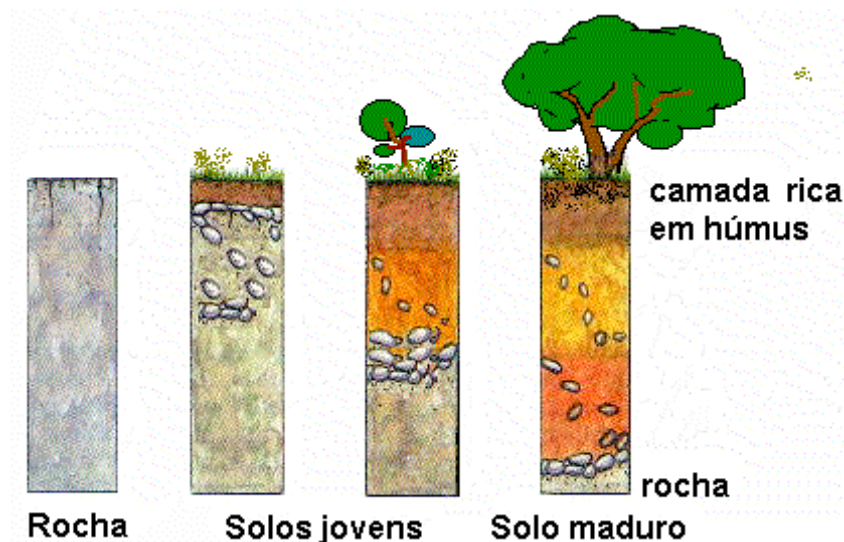


Figura 4 - Processo de formação de um solo a partir de uma rocha sã.

Todo este processo inicia-se com a separação de fragmentos rochosos, por acções mecânicas permitindo um posterior ataque químico por acção da água e outros agentes químicos. Este ataque é tanto mais eficaz quanto maior for a desagregação do maciço rochoso.

A meteorização pode assim ser dividida em física (ou mecânica), por vezes também denominada desagregação, e química (ou alteração). A primeira implica a separação de fragmentos rochosos, enquanto a segunda representa a destruição da estrutura cristalina dos minerais constituintes da rocha, sendo a meteorização física inicial de grande importância para a existência de meteorização química subsequente. Ambas estão fortemente dependentes de factores ambientais (clima e cobertura vegetal) e geológicos (geomorfologia, fracturação e composição e textura da rocha-mãe).

A natureza da rocha mãe, quer pela sua composição mineralógica quer pela sua textura, tem importância primordial no processo de meteorização mais eficaz e nos produtos resultantes do mesmo. A geomorfologia influencia fortemente a meteorização, uma vez que controla o ritmo de escoamento da água superficial, domina o ritmo de remoção dos componentes solúveis dos minerais constituintes e condiciona os ritmos erosivos e consequente exposição dos minerais não alterados.

Segundo Press, F. & Siever, R. (1997), o clima exerce um controlo sobre a velocidade de alteração: elevadas temperaturas e precipitação abundante aceleram o processo de meteorização, enquanto o frio e clima seco a retardam. Em climas frios a água não é quimicamente reactiva, uma vez que se encontra no estado sólido, no entanto pode actuar como uma cunha, alargando fendas e desagregando a rocha. Nas regiões

áridas a água não se encontra, na sua grande maioria, disponível. Em ambos os casos a meteorização química é muito lenta.

A presença de vegetação actua como um agente geológico que altera a rocha ainda mais rapidamente. Para além de reter a humidade, aloja uma variedade de organismos, bactérias e vegetação. Estas formas de vida criam um ambiente ácido que em combinação com a humidade é ideal para a meteorização química. As raízes das plantas e os organismos que escavam através do solo auxiliam a meteorização física criando fendas e fracturas.

Cruz (1995) refere um aspecto relacionado com a resistência à meteorização evidenciada pelos minerais, a qual está directamente relacionada com a sua temperatura de formação e composição química.

Para o caso dos minerais silicatados, de maior abundância na crosta terrestre, as séries de Bowen, indicadoras da evolução magmática em função do arrefecimento, podem ser utilizadas simultaneamente para descrever a resistência à meteorização de diversos minerais silicatados, denominando-se de séries de Goldich para este efeito, conforme se apresenta na Figura 5.


Estabilidade de alguns minerais comuns em comparação com as séries reaccionais de Bowen		
ESTABILIDADE DOS MINERAIS	VELOCIDADE DE ALTERAÇÃO	SÉRIES REACCIONAIS DE BOWEN
Mais estável Óxidos de ferro (hematite) Hidróxidos de alumínio (gibbsite) Quartzo Minerais de argila Moscovite Feldspato potássico (ortoclase) Biotite Feldspato sódico (albite) Anfíbolos Piroxena Feldspato cálcico (anortite) Olivina Calcite Halite Menos estável	Mais lento  Mais rápido	Último a cristalizar Último a meteorizar Quartzo Moscovite Ortoclase Biotite Anfíbola Minerais máficos ¹ Piroxena Olivina Plagioclases ² Albite Anortite 1 Série descontínua 2 Série contínua Primeiro a cristalizar Primeiro a meteorizar

Figura 5 - As séries de Goldish referem a estabilidade relativa de alguns minerais comuns em comparação com as séries reaccionais de Bowen (Adaptado de Press, F. & Siever, R., 1997)

Relativamente à composição química, os minerais ferro-magnesianos (minerais máficos), bem como os carbonatados e os sais, são pouco resistentes, enquanto os minerais silico-aluminosos (minerais félsicos) apresentam elevada resistência à meteorização.

1.2.1.1. Meteorização Física

Quando a rocha sólida se fragmenta por processos físicos ou mecânicos que não alteram a sua composição química, diz-se que sofre meteorização física. Os principais processos físicos envolvidos na desagregação das rochas segundo Cruz (1995) são:

- Expansão diferencial por alívio de pressão;
- Desenvolvimento de cristais nas fracturas e nos poros;
- Contração e expansão devido a ciclos de aquecimento e arrefecimento.

Mateus (2008) afirma que as rochas atingem superfície depois da desintegração e erosão das rochas suprajacentes. A remoção do material provoca um alívio de tensões possibilitando a sua descompressão e consequentemente origina abertura de fissuras. Estas fissuras aumentam a superfície susceptível a alteração por penetração de água, raízes de plantas, etc., que por sua vez exercem forças de expansão devido ao congelamento da água e aumento volumétrico das raízes durante o seu crescimento.

Os ciclos de aquecimento e arrefecimento provocam a acumulação de sais, por supersaturação, no decorrer do processo de evaporação, originando forças desagregadoras importantes localizadas no interior dos maciços. Estes ciclos de variação térmica provocam ainda variações volumétricas que conduzem ao incremento da fracturação pré-existente.

1.2.1.2. Meteorização Química

A meteorização química ocorre quando os minerais numa rocha são alterados ou dissolvidos quimicamente. Esta alteração química é estritamente dependente do tipo de rocha, nomeadamente da sua mineralogia e condições de génese.

As rochas cujas condições de formação se encontram em intervalos de pressão e temperatura elevados, designadamente as rochas ígneas e metamórficas, são susceptíveis à meteorização através de reacções de libertação de calor, com produção

de compostos de maior volume e menor densidade, como reacção de estabilização às novas condições superficiais.

A meteorização química pode ser descrita nos cinco tipos principais de reacções enunciados de seguida, e em todos estes existe a intervenção da água.

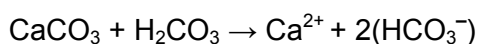
- Oxidação
- Carbonatação
- Hidratação
- Troca de bases
- Incorporação de catiões em depósitos orgânicos

Oxidação

A oxidação é o processo de meteorização química, pelo qual o oxigénio atmosférico (dissolvido na água) reage com os iões dos minerais, produzindo óxidos. Este processo é especialmente importante na meteorização de minerais, com teores elevados de ferro (minerais ferromagnesianos – olivinas, piroxenas e anfíbulas).

Carbonatação

O processo de carbonatação é baseado numa reacção em que ocorre a alteração e destruição química de calcários, que se traduz pela seguinte equação química:



sendo que a cada substância expressa na equação corresponde, respectivamente, às designações: carbonato de cálcio, ácido carbónico, ião cálcio e ião hidrogenocarbonato.

Hidrólise

A hidrólise dos materiais rochosos é uma reacção química lenta e específica, na qual os iões dos minerais reagem com os iões H^+ e HO^- da água, podendo originar novos minerais.

Hidratação

A hidratação envolve a adição de uma molécula completa de água à estrutura mineral. A água usada no processo causa expansão dos minerais, pelo que é também considerada uma forma de meteorização física.

Troca de bases

Envolve a transferência, mútua de catiões entre uma solução aquosa rica em catiões de um dado tipo e um mineral rico noutro. Este intercâmbio poderá provocar expansão ou desagregação completa da estrutura cristalina do mineral, libertando ainda outros compostos químicos.

Quelação

É um processo complexo, através do qual catiões metálicos são incorporados nas moléculas de diversos compostos orgânicos através de fortes ligações químicas.

1.2.2. Erosão e Transporte

A erosão é responsável por expor continuamente o material rochoso, criando condições propícias à sua alteração, ao mesmo tempo que novas rochas surgem em bacias de sedimentação.

Os agentes modeladores variam em função das condições climáticas, litológicas, estruturais e topográficas de cada região. Assim a acção dos rios só se faz sentir se houver águas correntes, da mesma forma que os glaciares só se encontram a latitudes/altitudes que permitem a formação e manutenção de gelo.

Afloramentos de rochas carbonatadas e de rochas intrusivas ou metamórficas respondem de formas diferentes ao mesmo agente erosivo, do mesmo modo que por uma questão de diferença, os agentes erosivos, os processos e efeitos que se verificam numa região montanhosa são diferentes dos verificados numa planície.

Estas condições reflectem-se nas diferentes paisagens com características geomorfológicas bem definidas que podemos encontrar na superfície terrestre.

Os materiais resultantes da meteorização e removidos do local estão sujeitos a deslocamento por acção da gravidade, pelo vento ou pela água (no estado líquido ou

no estado sólido). Existem, no entanto, materiais que permanecem perto do local onde têm origem formando os 'depósitos residuais'.

Gravidade

Um movimento de massa é uma forma de transporte por gravidade de massas de solo, rochas lama ou de outros materiais soltos ou não consolidados. Os movimentos de massa ocorrem quando a força da gravidade vence a resistência à deformação dos materiais do declive. Estes movimentos podem ser provocados por sismos, inundações ou por outros acontecimentos geológicos.

Os materiais movem-se então podendo cair, deslizar ou fluir (Figura 6). Os movimentos de massa podem deslocar pequenas quantidades de solo ao longo de um declive fraco, ou podem constituir enormes desprendimentos de solo que despejam toneladas de solo e rocha nos vales adjacentes às vertentes montanhosas.

O desgaste em massa é uma das consequências da meteorização e fragmentação de rochas e constitui uma parte importante da erosão, em especial em zonas montanhosas.

Uma vez que estes materiais foram fragmentados tornam-se assim mais susceptíveis a meteorização, pois tem uma área exposta aos agentes maior

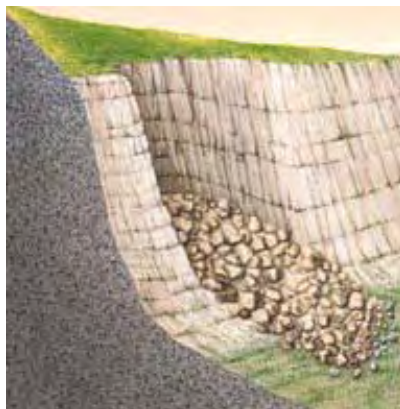


Figura 6 - Queda de rochas por acção da gravidade (Adaptado de Press, F. & Siever, R. 1997).

Água

A água desempenha, no domínio a geodinâmica externa da Terra, um papel multifacetado, englobando não só as acções no âmbito da meteorização e modelagem do relevo, como também do transporte dos produtos obtidos e sua sedimentação em condições favoráveis.

As águas pluviais, que se elevam até à atmosfera consumindo energia solar, tendem a cair por acção da força da gravidade, sendo portadoras de energia equivalente, a qual é aproveitada para realizar trabalho erosivo e transporte. Esta actividade erosiva pode ser apreciada à vista desarmada com o impacto das gotas de chuva com o solo, se as rochas apresentarem um certo grau de desagregação e se o coberto vegetal não as proteger.

Após cair, parte da água da chuva infiltra-se, outra parte escorre à superfície e outra evapora-se, regressando à atmosfera. Uma parte da água de infiltração pode ser absorvida pelas plantas a nível do solo, através das raízes, e ser devolvida à atmosfera por intermédio do fluxo transpiratório. Assim, é evidente que existem vários factores que regulam este balanço hídrico, o qual, por sua vez, é directamente determinante nos efeitos de erosão e pode influenciar os efeitos de transporte.

Quanto mais porosas forem as rochas, maior será a quantidade de água infiltrada e, consequentemente, menor será a quantidade de água que escorre superficialmente. Por seu turno, a vegetação dificulta a escorrência e promove a infiltração e a evaporação. Uma rocha pouco permeável e desprovida de vegetação facilita a escorrência e a sua própria erosão.

Gelo

Os glaciares em comparação com os rios têm tido uma menor participação no desgaste dos continentes. No entanto, o gelo é um agente de grande capacidade, mas que percorre distâncias reduzidas. Por seu lado, o gelo, sendo uma massa sólida, arrasta todos os fragmentos, independentemente do seu tamanho, resultando numa fraca selecção dos fragmentos rochosos e/ou minerais.

Vento

O vento é um fluxo horizontal de ar relativamente à superfície do planeta em rotação. Tal como nos fluxos de água, podemos descrever os fluxos de ar por linhas de corrente. Apesar de os ventos obedecerem a todas as leis da dinâmica de fluidos que se aplicam ao fluxo de água nos canais fluviais, existem algumas diferenças. Ao contrário dos fluxos de água nos canais dos rios, os ventos, geralmente, não se encontram confinados por fronteiras sólidas, à excepção da superfície do chão e de vales estreitos. Os fluxos de ar são livres de se espalharem em todas as direcções, incluindo o movimento ascensional para a atmosfera funcionando assim como

importantes agentes erosivos. A Figura 7 ilustra etapas da formação de um pavimento desértico, onde o vento remove as partículas mais finas deixando as mais grosseiras à superfície, prevenindo o substrato de futura erosão eólica.

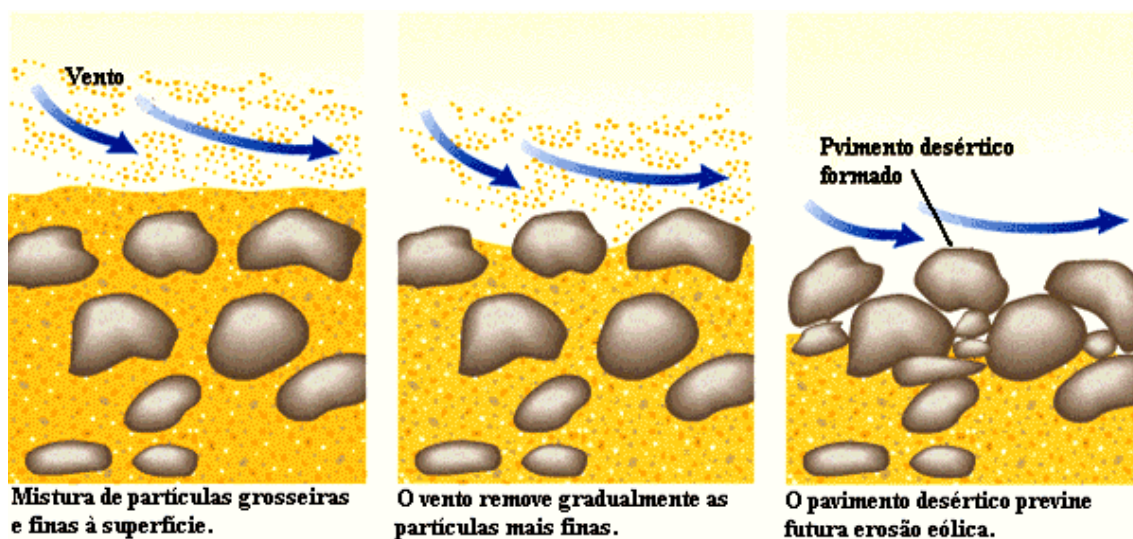


Figura 7 - Etapas da formação de um pavimento desértico. Adaptado de Press, F. & Siever, R. (1997)

1.3. Definição de solo ou maciço terroso. Classificação quanto à origem.

Os solos ou maciços terrosos cobrem uma grande parte da superfície terrestre. Nas zonas submersas as camadas finas de solo sobre a rocha são bastante importantes nas zonas geologicamente recentes, como no litoral dos continentes e junto aos vales formados pelos grandes rios.

São essas as zonas que a população tende a habitar e conseqüentemente a grande maioria de estruturas de engenharia estão implantadas sobre maciços terrosos.

Estes são formados por partículas minerais naturais que estão bastante separadas e que constituem uma grande massa que contém água, ar e, eventualmente, matéria orgânica.

Os espaços vazios denominam-se poros ou vazios. Estes podem conter água ou ar, e quando estão completamente preenchidos por água diz-se que o solo está saturado.

Os maciços terrosos podem ser classificados quanto ao seu modo de formação em dois grandes grupos, cada um com solos de características físicas, químicas e mecânicas distintas:

1. Solos Residuais

2. Solos Transportados

Solos Residuais

Os solos residuais são solos que ocupam o lugar da sua rocha mãe, ou seja da rocha que lhes deu origem. As partículas resultantes da alteração e da decomposição da rocha mãe não sofreram transporte pelos agentes erosivos. Assim os solos residuais ocorrem sobre formações rochosas semelhantes à respectiva rocha mãe.

A distinção entre solo e rocha não é um limite brusco e directo, mas sim, uma transformação gradual (Figura 8).

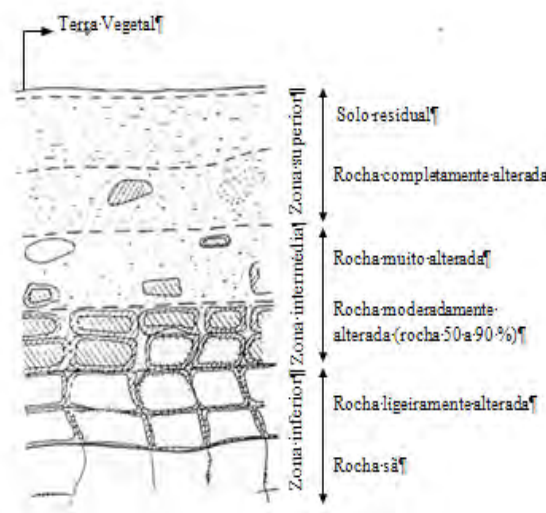


Figura 8- Perfil típico de um maciço rochoso com zona superficial alterada e com solos residuais (Little, 1996)

Cruz (1995), afirma que sua evolução se dá a partir da rocha e caracterizam-se pela perda de resistência e aumento de deformabilidade, no tempo, pela variação da granulometria devida à decomposição dos minerais instáveis e pela existência de uma estrutura de cimentação típica.

A composição deste tipo de solo depende da composição mineralógica da rocha original. Chiossi (1979) elaborou o quadro da figura seguinte, que fornece alguns exemplos.

Tipo de rocha	Composição mineral	Tipo de solo	Composição
Basalto	Plagioclase, piroxenas	Argiloso	Argila
Quartzito	quartzo	Arenoso	Quartzo
Filitos	Sericite	Argiloso	Argila
Granito	Quartzo, feldspato, mica	Areno-argiloso	Quartzo e argila
Calcário	Calcite	Argiloso	Argila

Figura 9 - Solos residuais em função do tipo de rocha (Chiossi, 1979).

Sob o ponto de vista da geotecnia, diversos autores entre os quais Deere e Patton (1971) propuseram perfis de meteorização que são apresentados na Figura 10.

	Descrição	RQD (NX)	Q (NX)	Premeabilidade relativa	Resistência relativa
Solo residual					
IA-Horizonte A	Solo superficial, com matéria orgânica; zona de lixiviação e eluviação.	—	0	média a alta	baixa a média
IB-Horizonte B	Zona rica em argila, concentrações de ferro, alumínio e silício, podendo resultar cimentação.	—	0	baixa	normalmente baixa
IC-Horizonte C	Presença de estruturas herdadas; boa graduação em materiais siltosos e arenosos; menos de 10 % de matações.	0	0-10%	média	baixa a média
Rocha alterada					
IIA-Transição	Diversificada, desde materiais terrosos a rochosos; areia fina a grossa; 10 a 95% de matações.	0-50%	10-90%	alta	média a baixa
IIB-Rocha parcialmente alterada	Rocha branda a dura; descontinuidades em graus de alteração distintos; feldspatos e micas parcialmente alterados.	50-75%	> 90%	média a alta	média a alta
Rocha sã	Descontinuidades inalteradas sem evidências ferrosas; feldspatos e micas inalteradas.	> 75%	em geral 100%	baixa a média	muito alta

Figura 10 - Perfil de meteorização em rochas ígneas e metamórficas (Deere e Patton, 1971)

Solos Transportados

Segundo Cruz (1995) os solos transportados formam, em geral, depósitos menos consolidados que os solos residuais, evoluindo de forma inversa em relação a estes últimos. Desta forma, estes solos tendem a ser controlados, sob o ponto de vista mecânico, pela evolução do índice de vazios, o que se traduz num aumento da resistência e diminuição da deformabilidade com o tempo, dado que partem de um estado solto, no momento da sedimentação, tornando-se progressivamente mais densos no decurso dos fenómenos diagenéticos. Por outro lado apresentam heterogeneidade, por vezes acentuada, não pela existência de estruturas-reliquia, de reduzida expressão nestes solos, mas por factores directamente relacionados com o agente transportador envolvido no processo. Deve notar-se ainda que, ao invés dos solos residuais, estes solos mantêm uma baixa taxa de variação das suas características granulométricas durante a sua evolução.

Em termos de classificação, os solos transportados podem ser divididos em vários tipos:

- 1) Solos de aluvião – resultam da deposição de materiais sólidos transportados pelas águas sempre que a corrente sofre variações de velocidade. Quanto ao modo de deposição apresentam-se em terraços ou em planícies de inundação;
- 2) Solos orgânicos - solos ricos em matéria orgânica, que se mistura com o solo transportado;
- 3) Solos de coluviões - são aqueles cujo transporte se deve exclusivamente à acção da gravidade e localizam-se em geral, no sopé de encostas ou outras elevações e a sua composição depende do material existente nessas mesmas elevações;
- 4) Solos eólicos - solos transportados pelo vento.

Capítulo 2.

PARÂMETROS MECÂNICOS

2. PARÂMETROS MECÂNICOS

Os solos são habitualmente descritos em termos de comportamento mecânico, por parâmetros numéricos, que podem ser agrupados da seguinte forma:

- Estado de tensão *in situ*
- História de tensões
- Resistência e relações tensão-deformação

O conhecimento das tensões actuantes num maciço, sejam elas devidas ao seu peso próprio ou provenientes de um carregamento em superfície é essencial para prever o seu comportamento em praticamente todas as obras de engenharia. De seguida serão brevemente abordados os conceitos teóricos associados a cada um dos parâmetros enunciados.

2.1. Estado e história de tensões

Estado de tensão

Os solos são constituídos por partículas e as forças são transmitidas de partícula a partícula e suportadas pela água dos vazios.

Em partículas granulares a transmissão de forças é feita através do contacto directo grão a grão enquanto nas partículas de argila pode ocorrer através de água absorvida. A transmissão dá-se por áreas muito reduzidas.

Ao longo de um plano horizontal no solo tem-se esforços decompostos em componentes normais e tangenciais.

Tensão normal:

$$\sigma = \frac{\sum N}{\text{área}} \quad (1.1)$$

Tensão tangencial:

$$\tau = \frac{\sum T}{\text{área}} \quad (1.2)$$

Um maciço terroso está sujeito a tensões que podem ser devidas ao seu peso próprio ou a propagação de cargas externas aplicadas ao terreno.

As tensões exercidas pelo seu próprio peso são denominadas por tensões de repouso do solo.

A definição do estado de tensão “in situ” de um maciço implica o conhecimento das suas tensões efectivas vertical, σ'_v , e horizontal, σ'_h . Tendo em conta que em solos apenas as forças gravíticas tem influência, a determinação da tensão efectiva vertical é determinada pela expressão que relaciona o peso volúmico do solo (γ) e a profundidade a que se quer calcular a tensão:

$$\sigma_v = \gamma \times z \quad (2.1)$$

$$\mu = \gamma_w \times z_w \quad (2.2)$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu \quad (2.3)$$

No estado de repouso, as tensões efectivas horizontal e vertical de um solo são relacionáveis através de um parâmetro característico de solos denominado coeficiente de impulso em repouso, K_0 . Assim a tensão horizontal é dada pela expressão:

$$\sigma'_h = K_0 \times \sigma'_v \quad (2.4)$$

Na prática da mecânica dos solos define-se tensão efectiva como a tensão que efectivamente actua nos contactos grão a grão respondendo pelas características de deformabilidade e resistência dos solos.

Geralmente toda a deformação nos solos está relacionada com a variação na tensão efectiva, podendo o solo sofrer deformação sem sofrer acréscimo de tensão total, basta que haja variação da pressão da água nos poros, que faz aumentar a tensão efectiva.

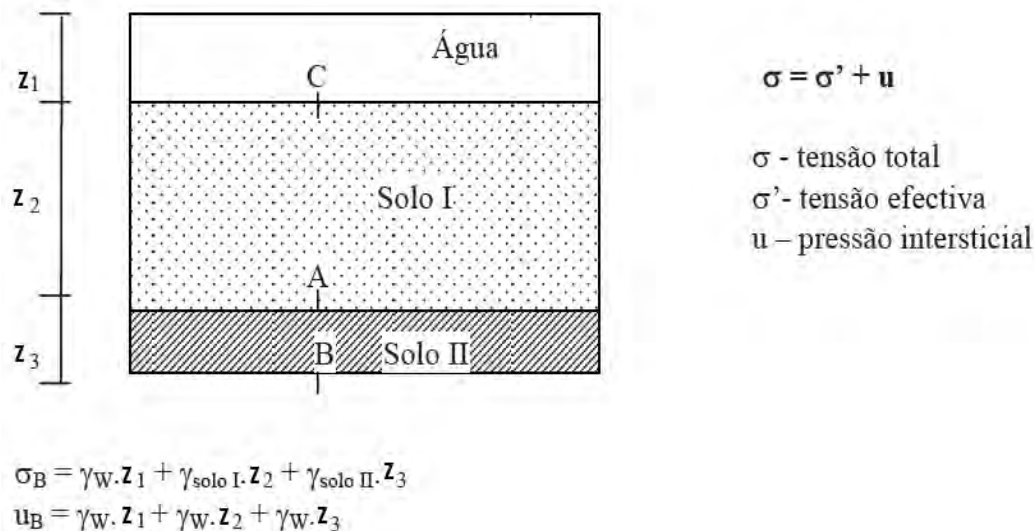


Figura 11 - Cálculo de tensões totais e efectivas num maciço terroso.

História de Tensões

Um dos conceitos fundamentais para perceber o comportamento mecânico de um maciço terroso é o conhecimento da história de tensões a que o solo foi submetido. Esse conhecimento é essencial no que diz respeito aos solos de natureza argilosa dado que as suas características de resistência dependem dos níveis de tensão e ciclos de carga-descarga a que os mesmos foram submetidos.

A história de tensões a que um maciço esteve sujeito, é expressa quantitativamente pelo chamado grau de consolidação OCR dado pela relação entre a tensão efectiva de pré-consolidação σ'_p e pela tensão efectiva vertical de repouso σ'_{v0} . (Matos Fernandes, 2006)

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \quad (3.1)$$

Quando a tensão efectiva vertical é um valor igual à tensão de pré consolidação diz-se que o solo é normalmente consolidado e o seu OCR será igual à unidade. Por sua vez, quando a tensão efectiva vertical de repouso é inferior à tensão máxima de consolidação a que o solo foi submetido até então, OCR toma valores superiores à unidade e diz-se que o solo foi sobreconsolidado. No caso em que a tensão de sobreconsolidação é inferior à tensão vertical efectiva de repouso diz-se que o solo se encontra em fase de consolidação hidrodinâmica, para o nível de tensão vertical suprajacente designando-se por solo sub-consolidado.

Matos Fernandes (2006) propõe uma classificação de solos argilosos quanto ao grau de sobreconsolidação descrita na tabela seguinte.

Tabela 1 - Classificação de solos argilosos quanto ao grau de sobreconsolidação (Matos Fernandes, 2006)

Classificação	OCR
Normalmente consolidado	≈ 1
Ligeiramente sobreconsolidado	1 a 2
Medianamente sobreconsolidado	2 a 5
Fortemente sobreconsolidado	>5

2.2. Parâmetros de Resistência

Em termos de resistência o estudo do comportamento mecânico dos solos é dividido em duas situações distintas: condições drenadas e condições não drenadas.

Esta distinção é baseada no comportamento dos diferentes tipos de solo existentes. Sendo os solos arenosos caracterizados como solos de elevada permeabilidade são por isso melhor representados por comportamentos drenados, enquanto em solos argilosos exibem tanto comportamento drenado (a longo prazo) como não drenado (curto prazo) devido à sua baixa permeabilidade.

Ao modificar o estado de tensão de um solo produzem-se deformações que podem originar a sua rotura. A forma mais habitual de rotura em solos é por corte.

A resistência ao corte de um solo pode ser definida como o máximo de tensão desviatória que um solo pode suportar sem sofrer rotura. Em situações de comportamento drenado, o critério de rotura mais utilizado deriva do critério de Mohr-Coulomb, que relaciona tensões normais efectivas com tensões tangenciais que actuam em qualquer plano do solo. Este critério estabelece que, para um solo saturado a resistência ao corte drenada é dada pela expressão:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi \quad (4.1)$$

Onde:

τ - Resistência ao corte

c' – Coesão efectiva

σ - Tensão normal efectiva ou total

$\tan\phi$ - Coeficiente de atrito

ϕ Ângulo de atrito do solo

Os parâmetros de resistência de um solo são assim determinados por uma circunferência de Mohr-Coulomb, cuja envolvente de rotura é a recta que define os parâmetros de corte (Figura 12).

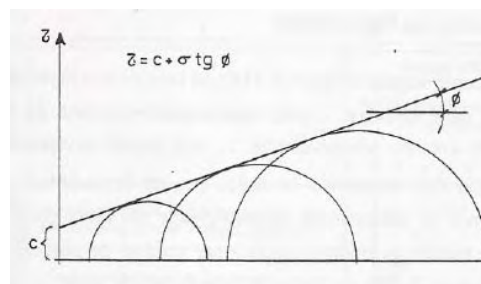


Figura 12 Determinação dos parâmetros de resistência através da envolvente de Mohr (Matos Fernandes, 2006).

A resistência drenada dos solos pode então ser definida como o resultado da acção entre o ângulo de atrito e a coesão (Machado, 1997).

Por seu lado, num solo em condições não drenadas o crescimento da tensão normal média, apenas faz deslocar para a direita as circunferências de Mohr em tensões totais na rotura, sem aumentar o respectivo raio, isto é, a sua resistência ao corte. Em consequência, a envolvente de Mohr em tensões totais para uma argila submetida a cargas triaxiais não drenadas e partindo de um dado estado de tensão efectiva de consolidação, é paralela ao eixo das abcissas (Figura 13). De facto, a argila evidencia um ângulo de atrito nulo, obedecendo ao critério de rotura de Tresca. A máxima tensão de corte mobilizável no solo designa-se por resistência não drenada, c_u , parâmetro com uma enorme relevância prática nos problemas que envolvem o carregamento não drenado de argilas Matos Fernandes (2006).

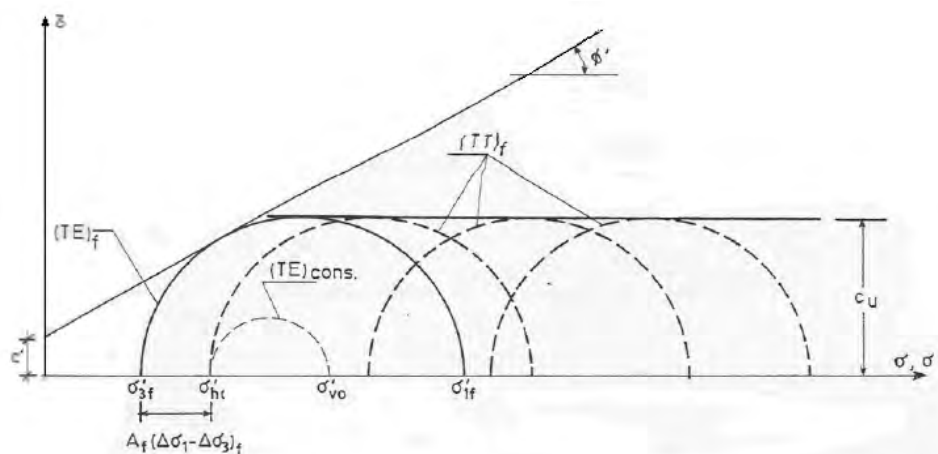


Figura 13 - Envolvente de Mohr em tensões totais de uma argila – resistência não drenada (Matos Fernandes, 2006).

2.3. Parâmetros de Deformabilidade.

Os parâmetros de deformabilidade dos solos são grandezas que traduzem relações entre tensões aplicadas e deformabilidade resultante (extensão). De modo a quantificar em termos numéricos estes parâmetros é necessário conhecer:

- Tensão aplicada
- Extensões resultantes segundo o eixo de aplicação de carga (longitudinal) e o normal a este (transversal).

O módulo fundamental de deformabilidade é o módulo de Young ou módulo de elasticidade, E , que traduz a razão entre a tensão aplicada, σ_a , e a extensão axial sofrida, ϵ_a , isto é:

$$E = \frac{\sigma_a}{\epsilon_a} \quad (5.1)$$

Por seu lado, a relação entre extensões longitudinal e transversal é traduzida pelo coeficiente de Poisson ν , definido pela razão entre extensão tangencial, ϵ_t , e extensão axial, ϵ_a :

$$\nu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} \quad (5.2)$$

A relação entre as extensões sofridas aquando a aplicação de uma tensão é expressa pelo coeficiente de Poisson.

O coeficiente de Poisson é um valor constante admitido em função de duas situações:

1. Se o solo é caracterizado por comportamento drenado (apresenta variação de volume quando sujeito a tensões - ν varia entre 0,2 e 0,35)
2. Se o solo é caracterizado por comportamento não drenado (não apresenta variação de volume quando sujeito a tensões - ν_u igual a 0,5)

Estes dois parâmetros caracterizam na sua essência a deformabilidade do solo, sendo possível deduzir a partir deles o módulo distorcional G e o módulo de deformabilidade confinado, conforme explicado em seguida.

O módulo de distorção é a razão entre a tensão de corte aplicada e a respectiva extensão distorcional, que pode ser obtida através de E e ν com base na expressão seguinte:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.3)$$

Por outro lado, existem situações em que o solo pode ser representado por um modelo confinado (aterros) onde as deformações horizontais estão impedidas. Nestes casos os parâmetros habitualmente utilizados resultam da teoria da consolidação de Terzaghi e são estabelecidos com base nos diagramas e / σ e $e / \ln \sigma$.

O índice de compressibilidade, C_c , é definido como a relação entre a variação do índice de vazios e a variação do logaritmo da tensão, no ramo virgem:

$$C_c = - \Delta e / \Delta \log \sigma' \quad (5.4)$$

No caso particular do cálculo ser efectuado sobre a parte inicial da curva referente à recompressão, então a relação denomina-se de índice de recompressão, C_r , o qual oscila entre 1/5 e 1/10 do índice de compressibilidade.

O coeficiente de compressibilidade a_v é definido pela relação entre a variação do índice de vazios, Δe , e a variação da tensão aplicada, $\Delta \sigma'$:

$$a_v = - \Delta e / \Delta \sigma' \quad (5.5)$$

Por sua vez o coeficiente de compressibilidade volumétrica, m_v , é dado pela relação entre a variação da porosidade n com a tensão aplicada.

$$m_v = - \Delta n / \Delta \sigma' = a_v / (1 + e_0) \quad (5.6)$$

O inverso do coeficiente de compressibilidade volumétrica, $1 / m_v$, traduz um módulo de deformabilidade confinado, E_{oed} , o qual se pode relacionar com E através da expressão:

$$E_{oed} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5.7)$$

Capítulo 3.

PRESSIÓMETRO MÉNARD

3. PRESSIÓMETRO DE MÉNARD

3.1. Introdução

O pressiómetro foi desenvolvido em França em meados dos anos 50 pelo engenheiro francês Luís Ménard.

O seu princípio de utilização é baseado na utilização de um elemento de forma cilíndrica projectado para aplicar uma pressão uniforme nas paredes de um furo de sondagem, através de uma membrana flexível, promovendo assim a consequente expansão de uma cavidade cilíndrica na massa de solo”. Modernamente, o equipamento é reconhecido como ferramenta rotineira de investigação geotécnica, sendo particularmente útil na determinação do comportamento tensão-deformação de solos *in situ*.

A interpretação dos resultados é baseada nos conceitos de expansão de uma cavidade cilíndrica, possibilitando a estimativa de parâmetros que caracterizam o solo: módulo de distorção, ângulo de atrito interno, módulo de deformabilidade e coesão não drenada. É portanto um ensaio de considerável alcance e interesse para a solução de projectos de engenharia. (Mántaras & Schnaid, 2001)

Em 1963, Ménard publicou as primeiras equações e gráficos relatando os resultados pressiométricos aplicados ao cálculo de assentamentos em fundações e capacidade de carga (Ménard, 1963), com isso marcou o início de uma série de artigos e publicações. As condições do solo eram investigadas usando o pressiómetro. Mais tarde observou as fundações actuais, as quais haviam sido dimensionadas a partir dos resultados dos ensaios pressiométricos, verificando que os dados pressiométricos enquadram o comportamento das fundações com uma eficácia surpreendente. Segundo Baguelin et al. (1978), desde 1967 é possível projectar qualquer tipo de fundação em qualquer solo através dos resultados dos ensaios pressiométricos.

Os equipamentos actuais permitem a realização de ensaios em materiais que vão desde os solos Lodosos até às rochas brandas ou mesmo rochas sãs.

O campo de aplicação deste ensaio engloba assim vários tipos de solo e dele, através de correlações semi-empíricas a partir dos parâmetros do ensaio, podem então obter-se parâmetros geotécnicos relacionados com a resistência e deformabilidade.

A Figura 14 resume as aplicações dos diferentes ensaios de campo que visam obter parâmetros do solo. Os ensaios pressiométricos por fornecerem uma medida contínua do comportamento tensão-deformação do solo durante a expansão/contracção de uma cavidade cilíndrica são mais atraentes do que outros ensaios *in situ*, sendo portanto um ensaio de considerável alcance e interesse em engenharia (Schnaid, 2000).

Grupo	Equipamento	Tipo Solo	Parâmetros do Solo												Tipo de Material						
			Perfil	u	ϕ'	S_u	D_r	m_v	c_v	k	G_o	σ_h	OCR	σ - ϵ	Rocha dura	Rocha branda	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	Turfa
Penetrômetro	Dinâmico	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	B	B	B
	Mecânico	B	A/B	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	-	-	C	C	A	A	A	A
	Elétrico (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B	-	-	C	C	A	A	A	A
	CPTU	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C	-	C	-	A	A	A	A
	SCPT/SCPTU	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	B	-	C	-	A	A	A	A
	DMT	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C	C	C	-	A	A	A	A
	SPT	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	A	A	A
Pressiómetro	Resistividade	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	-	C	-	A	A	A	A
	Pré-furo (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	A	A	B	B	B	A	B
	Autoperf. (SBP)	B	B	A	B	B	B	B	A	B	A	A/B	B	A/B	-	B	-	B	B	A	B
	Cone press. (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A	C	C	C	-	C	-	B	B	A	A
Outros	Palheta	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C	B	-	-	-	-	-	A	B
	Ensaio de Placa	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	B	A	B	B	A	A	A
	Placa helicoidal	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	-	-	-	A	A	A	A
	Permeabilidade	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	B
	Ruptura hidráulica	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	B	B	-	-	C	A	C
	Sísmico	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	A	A	A	A	A	A	A

Potencial de aplicação: A = alto; B = moderado; C = baixo; - = nenhum

Parâmetros do solo: u = poro-pressão "in situ"; ϕ' = ângulo de atrito efetivo; S_u = resistência ao cisalhamento não-drenada; D_r = densidade relativa; m_v = coeficiente de variação volumétrica; c_v = coeficiente de adensamento; k = coeficiente de permeabilidade; G_o = módulo cisalhante a pequenas deformações; σ_h = tensão horizontal; OCR = razão de pré-adensamento; $\sigma-\epsilon$ = relação tensão-deformação

Figura 14 - Aplicação dos ensaios de campo (Lunne et al. 1997)

3.2. Equipamento

A constituição e o modo de funcionamento particular de cada unidade constituinte do pressiómetro pode variar consoante se tratem de pressiómetros convencionais ou auto-perfuradores, variando ainda de modelo para modelo.

Existem desta forma vários tipos de equipamentos que diferem entre si pelo modo de instalação da sonda no solo, os quais correspondem também aos distintos equipamentos normalmente agrupados nas seguintes categorias:

- Pressiómetros auto-perfuradores (SBP)
- Pressiómetros de cravação (PIP)
- Pressiómetros com pré-furação (PBP)

Pressiómetros Auto-Perfuradores:

O princípio da técnica do pressiómetro auto-perfurador consiste em minimizar os efeitos da perturbação do solo ao redor da sonda, gerados pela execução prévia do furo e inserção do equipamento no terreno. Neste ensaio um tubo de parede fina é cravado no solo enquanto as partículas de solo deslocado pelo dispositivo são fragmentadas por uma sapata cortante e removidas por fluxo de água para a superfície (Schnaid, 2000). A figura seguinte ilustra os detalhes de uma sonda auto-perfuradora. Este ensaio pode ser realizado com tensão controlada ou deformação controlada ou ainda combinando os dois procedimentos.

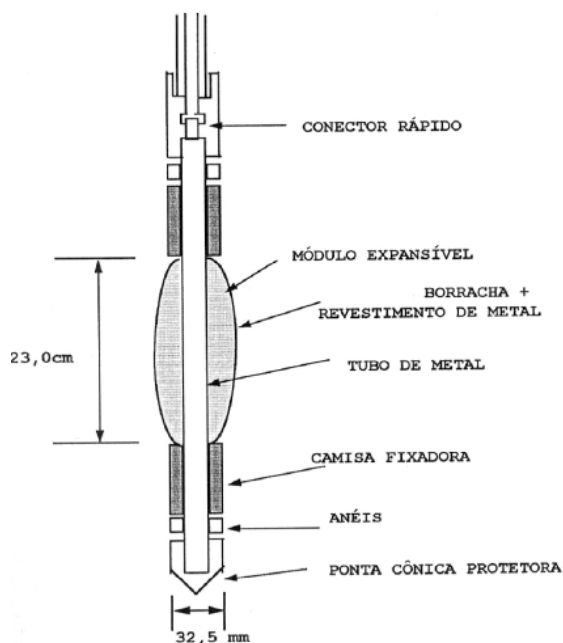


Figura 15- Sonda Auto-perfuradora (Cavalcante, 1997)

Pressiómetros de cravação

No pressiómetro de cravação a penetração da sonda no terreno é forçada por cravação. O cone-pressiómetro é um equipamento típico que se enquadra nessa categoria. O procedimento de ensaio consiste na interrupção da cravação do cone em cotas pré-estabelecidas, nas quais se procede à expansão da sonda pressiométrica. A interpretação do cone pressiômetro é mais complexa devido à expansão da cavidade cilíndrica ocorrer num solo já perturbado pela penetração do cone. A Figura 16 ilustra o cone-pressiómetro.

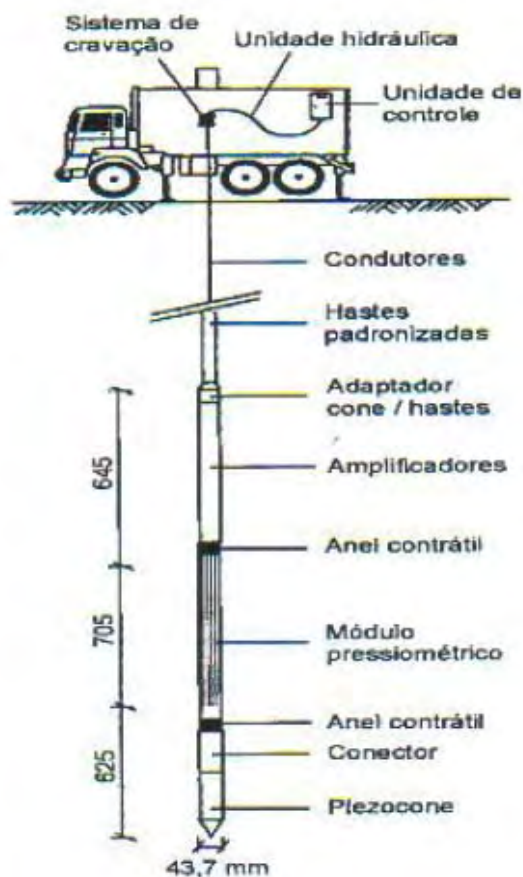


Figura 16 - Ilustração do cone-pressiómetro (Lunne et. al. 1997)

Segundo Lunne e Powell (1993) as principais vantagens deste equipamento são a elevada repetibilidade, baixo custo e o contínuo monitoriamento obtido a partir dos dados do piezocone durante a penetração.

No âmbito deste trabalho apenas serão analisados e discutidos dados obtidos com o pressiómetro de pré-furação, pelo que se seguirá a sua descrição mais detalhada.

Pressiómetros com pré-furação (Pressiómetro de Ménard)

O pressiómetro Ménard é essencialmente constituído por 3 unidades: a sonda pressiométrica (na qual está contida a célula de medição), a unidade de tubagem coaxial e a unidade de controlo pressão-volume. (Figura 17 e Figura 18)

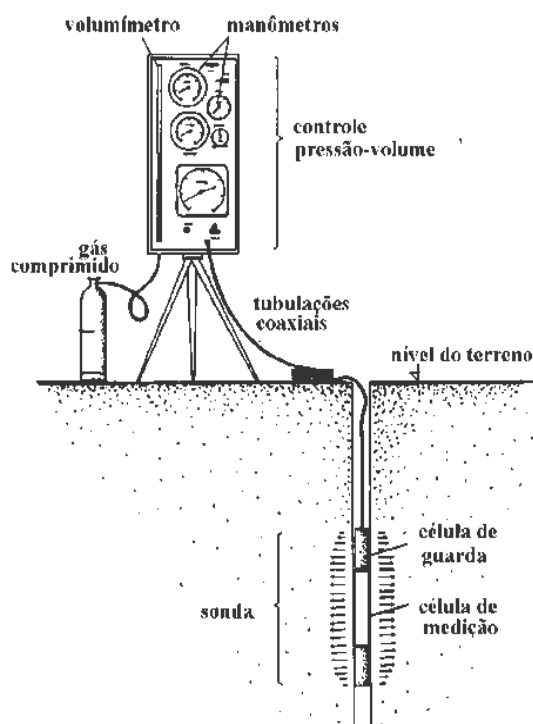


Figura 17 - Ilustração dos elementos constituintes do pressiómetro de Ménard (Schnaid, 2000)

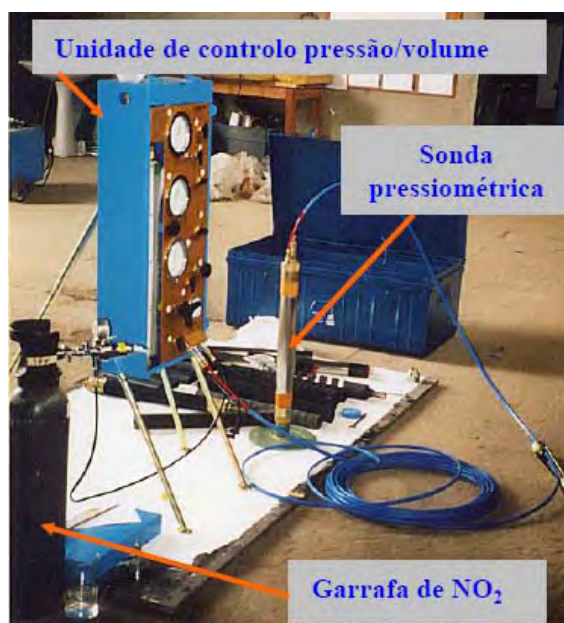


Figura 18 - Foto do Pressiómetro de Ménard (Rodrigues, 2003)

A sonda (Figura 19) é constituída por um corpo de aço contido numa membrana flexível e impermeável, no interior da qual se encontram três unidades independentes: a célula central ou de medição, e duas células de guarda. A função destas é garantir na zona central condições próximas da deformação plana que facilitem a interpretação dos resultados.

A sonda é pressurizada com água na célula central e com ar nas células de guarda. No caso do pressiómetro Ménard com sonda tipo GC, as células de guarda não são individualizadas, são formadas pela camisa exterior que protege a célula de medição.



Figura 19 - Pormenores da sonda pressiométrica (Rodrigues, 2003)

Existem diferentes tipos de membranas, desde membrana simples de diversas espessuras, até membranas de borracha reforçadas e mesmo membranas metálicas onde cada um destes tipos é escolhido em função das características dos materiais a ensaiar. A espessura da membrana pode variar de 3mm para utilização em solos lodosos a 6mm para utilização em solos com maior resistência.

A tubagem é o elemento de ligação entre a sonda e a unidade de controlo pressão-volume, necessário para permitir a troca de ar e de água entre os dois elementos.

A unidade de controlo pressão-volume (CPV) é constituída por um conjunto de ligações, tubagens e aparelhos de medida. Tem como funções principais o controlo da aplicação de pressões nas células e a medição das variações volumétricas na célula de medição.

Podem ser encontrados no mercado vários tipos de pressiómetros em que as suas diferenças significativas não têm apenas a ver com a evolução da tecnologia mas também com os requisitos dos próprios solos para os quais foram desenvolvidos. Dos modelos de pressiómetros que desde 1955 o “ Centre d’Etudes Ménard” tem construído todos têm em comum as seguintes características:

- Três células, uma das quais de medida e outras duas de guarda.
- Admite-se que qualquer deformação da sonda é resultante da deformação do solo
- O fluído da célula de medida é a água
- A fonte de pressão é uma garrafa de gás comprimido

Os diâmetros da sonda baseiam-se nas normas DCDMA (“ Diamond Core Drill Manufacturer’s Association”-Tabela 2).

Tabela 2 - Sondas Pressiométricas normalizadas (Cestari, 1990)

	Φ Sonda (mm)	Φ Furo (mm)	
		Mínimo	Máximo
EX	32	34	38
XA	44	46	52
BX	58	60	66
NX	70	74	80

3.3. Perturbações na realização do ensaio

Na interpretação do ensaio pressiométrico considera-se que a sonda é infinitamente longa, para que a sua expansão seja perfeitamente radial, representado assim correctamente a expansão de uma cavidade cilíndrica no seu todo. O estado de deformação plana é um estado especial em que a distorção e a deformação normal numa direcção, por exemplo, na direcção z, são nulas. Porém na prática, a componente de deformação na perpendicular à expansão da sonda é diferente de zero.

Por razões práticas é fácil perceber que a sonda do pressiómetro tem um comprimento finito, tendo assim algumas condicionantes:

A expansão da cavidade no solo não é puramente radial, particularmente nos extremos da sonda.

Devido à rigidez da membrana a magnitude da sua expansão não é uniforme e decresce para o final.

A Figura 20 ilustra a influência do comprimento finito da sonda na expansão da cavidade, considerando:

- Sonda Pressiométrica actual para furo de 60mm
- Sonda Pressiométrica actual com a célula central isolada
- Pequena célula de medida na célula central
- Deslocamento teórico para uma sonda de comprimento infinito.

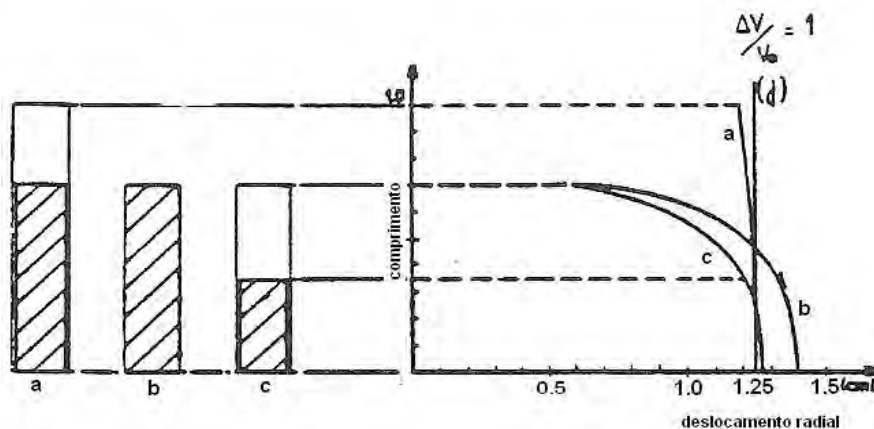


Figura 20 - Efeito do comprimento da sonda na expansão da cavidade (Baquelin et al. (1978)

Torna-se assim um erro considerar que toda a deformação da sonda representa perfeitamente uma deformação radial na cavidade. Todavia, segundo Briaud (1992), o facto de se usar uma relação comprimento/diâmetro maior ou igual a 6,5 e o uso de células de guarda tende a diminuir as deficiências causadas pela não obtenção de um cilindro infinito e a de uma expansão perfeitamente cilíndrica.

Para realizar um ensaio de qualidade, o modo como se faz o furo onde a sonda irá ser inserida influencia também os resultados.

A preparação de um furo de qualidade é o factor mais importante para obtenção de um ensaio satisfatório. Segundo Briaud (1992), duas condições são necessárias para obter um furo de qualidade:

Diâmetro do furo deve satisfazer a tolerância:

$$1,03 D_{\text{Sonda}} < D_{\text{Furo}} < 1,20 D_{\text{Sonda}}$$

O equipamento e método utilizados para a sua preparação devem causar a menor perturbação possível.

É importante referir que os equipamentos e métodos de perfuração deverão ser utilizados em função dos tipos de solo, de maneira a minimizar e evitar perturbações. O ensaio deve ser realizado imediatamente após a execução do furo, para evitar o risco de alteração das características do maciço por expansão.

Uma indicação da qualidade do furo é dada pela forma da curva pressiométrica que se obtém, influenciada também pelo modo de inserção da sonda no solo (Figura 21).



Figura 21 - Inserção da sonda no furo

A Figura 22 mostra exemplos de curvas pressiométricas obtidas em função da qualidade do furo. Somente ensaios bem realizados com traços de curva bem definidos, apresentam resultados onde é possível interpretação para obter parâmetros geotécnicos de interesse. A curva 2 mostra o caso de um furo muito largo em relação

ao diâmetro da sonda, neste caso um grande volume líquido será necessário para que a sonda atinja as paredes da cavidade. Assim a pressão limite não é alcançada podendo obter-se apenas algumas informações sobre a deformabilidade do solo. A curva 3 mostra um exemplo de curva pressiométrica obtida quando o furo é muito pequeno e perturbado, ou quando o ensaio é executado num solo expansivo, casos em que o módulo determinado não é representativo da situação real (Briaud, 1992).

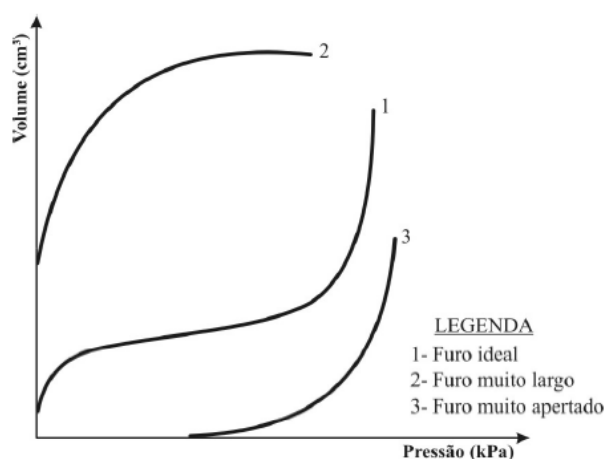


Figura 22 - Diferentes formas de curvas pressiométricas obtidas em função da qualidade do furo (ASTM D4719 – 1987)

3.4. Vantagens e desvantagens do pressiómetro de Ménard

Vantagens

O pressiómetro tem a vantagem de, ao contrário de outros ensaios *in situ*, conseguir medir a relação tensão deformação associada à expansão de uma membrana infinitamente longa em todo o tipo de solos.

Uma outra vantagem é devida à geometria simples do processo expansivo, pois teoricamente permite relacionar a curva pressiométrica obtida com a deformabilidade *in situ* através dos parâmetros notáveis do comportamento mecânico dos solos (pressão inicial, pressão de fluência, pressão limite e módulo pressiométrico). Além disso a qualidade do ensaio pode ser controlada através da forma da respectiva curva (Cavalcante, 1997).

Outra consideração importante é o tempo de resposta do equipamento, pois em poucos minutos é possível obter parâmetros que caracterizam o solo.

Desvantagens

No ponto de vista dos parâmetros mecânicos do solo, o ensaio PMT tem algumas desvantagens. As condições de drenagem nos solos e a sua permeabilidade são geralmente desconhecidas durante a realização do ensaio, o que pode perturbar a sua interpretação. Com efeito, a drenagem não pode ser controlada, assim como também não pode ser medida a pressão neutra em ensaios com pré-furação.

Outra importante desvantagem do ensaio pressiométrico reside no controlo de qualidade da furação e inserção da sonda que induzem desvios significativos em relação ao comportamento *in situ*.

A eficácia dos resultados depende assim do processo de furação, técnica de inserção da sonda, da experiência do operador do instrumento e da qualidade da calibração.

3.5. Execução do ensaio

O ensaio com o pressiómetro de Ménard (PMT) é essencialmente um ensaio de carga *in situ*, efectuado no terreno, realizado após furação prévia. O ensaio assenta numa boa fundamentação teórica o que lhe confere maior credibilidade em relação a ensaios de campo que utilizam correlações empíricas. Como foi referido anteriormente este ensaio é analisado mediante conceitos da expansão de uma cavidade cilíndrica de comprimento infinito no interior do solo. É necessária uma completa percepção do modo de funcionamento do equipamento para o executar correctamente.

O ensaio pressiométrico deve ser executado de acordo com a norma americana ASTM D4719 (1987) ou a norma francesa NF P94-110 (1991), que indicam o modo de obter parâmetros de resistência e deformabilidade do solo nomeadamente módulo Pressiométrico, E_{PMT} , pressão de fluência, P_F , e pressão Limite, P_L .

O ensaio consiste na colocação da sonda dentro de um furo de sondagem na cota desejada com o objectivo de a expandir mediante a aplicação de incrementos de pressão de mesma magnitude. Com estes resultados é possível traçar uma curva pressiométrica a partir da qual se procede ao cálculo dos diversos parâmetros de ensaio.

O furo de sondagem é feito de forma a não perturbar o maciço e os métodos de furação são seleccionados em função do tipo de solo (ASTM D4719, 1987)

Na Figura 23 é ilustrada a realização de um furo através de ferramentas rotativas em solos lodosos.



Figura 23 - Execução de um furo para realização do ensaio PMT em solos Lodosos.

O ensaio é executado sob tensão controlada com correspondente controlo da variação de volume de uma sonda de formato cilíndrico com capacidade máxima de volume 700cm^3 . A expansão da sua célula central é registada e a função das células de guarda é garantir que as deformações em torno da célula de medição sejam puramente radiais, satisfazendo o estado de deformação plana.

No ensaio pressiométrico de Ménard, é necessário o prévio conhecimento do tipo de solo a ensaiar de modo a definir os incrementos de pressão aplicados em função do tipo de solo e sua correspondente pressão limite estimada (Tabela 3). Cada incremento de pressão é definido como um décimo da pressão limite tabelada.

Tabela 3 - Tabela para estimativa da pressão limite do solo (Briaud, 1992)

Solos	PL(kPa)	NSPT/30cm	Cu(kpa)
Areia Fofa	0-500	0-10	-
Areia Média	500-1500	10-30	-
Areia Densa	1500-2500	30-50	-
Areia Muito Densa	>2500	>50	-
Argila Mole	0-200	-	0-25
Argila Média	200-400	-	25-50
Argila Rija	400-800	-	50-100
Argila Muito Rija	800-1600	-	100-200
Argila Dura	>1600	-	>200

Iguais incrementos são aplicados na sonda e o nível de tensão é mantido constante por um intervalo de tempo normalmente de um minuto, durante o qual são registadas as leituras da variação de volume aos 15, 30 e 60 segundos. Num ensaio convencional são usados aproximadamente 8 a 14 incrementos de pressão onde no último escalão deve ser atingida a pressão limite (P_L) correspondente ao estado limite de rotura no terreno quando sujeito a uma pressão uniforme crescente.

Na prática a pressão limite é um valor que corresponde a duplicar o volume inicial da cavidade. Até esse valor devem garantir-se os incrementos de carga atrás referidos e registarem-se os valores de variação de volume a 30s e a 60s. Assim o ensaio termina quando se atinge uma expansão correspondente ao dobro do volume inicial da cavidade ou quando é atingida a pressão limite do equipamento.

Obtêm-se desta forma diagramas tensão-deformação que permitem determinar as características mecânicas do solo e posteriormente efectuar o dimensionamento de fundações. A curva pressiométrica bruta (Figura 24) é obtida com as leituras da variação de volume aos 60 segundos em função das pressões aplicadas e nesta é possível observar as diversas fases do ensaio:

Fase OA – Fase de adaptação da sonda às paredes do furo, teoricamente relacionada com o estado de tensões *in situ*.

Fase AB – Fase pseudo-elástica da qual se obtém o módulo pressiométrico que relaciona as tensões e deformações, obtido relacionando os parâmetros de ensaio P_0 e P_F .

Fase BC - Fase plástica cuja análise fornece parâmetros de resistência dos solos.

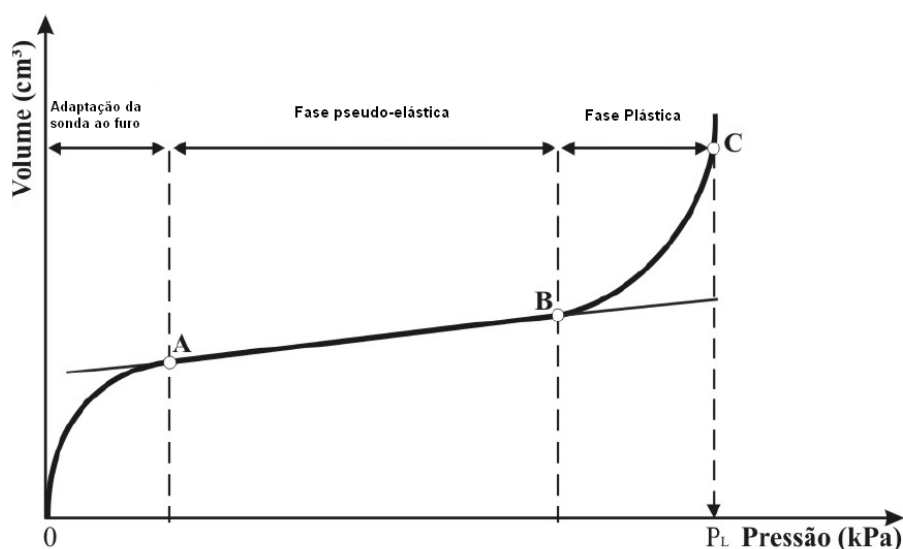


Figura 24 - Fases de uma curva pressiométrica ideal do ensaio Ménard (Sandroni e Brandt, 1983)

A primeira fase OA corresponde ao início do ensaio quando a sonda começa a pressionar as paredes do furo restabelecendo as condições de repouso do solo, iniciando a sua expansão.

A fase seguinte AB define o comportamento elástico do solo e onde se conhece o módulo pressiométrico de Ménard (E_{PMT}) calculado a partir do declive da recta que melhor se ajusta nesta fase. Teoricamente admite-se que as tensões no ponto A são as mesmas do que as do solo em repouso e antes da execução do furo, embora com algumas condicionantes. Neste ponto é definida a pressão inicial P_0 e o tamanho inicial da cavidade é dado por $V_i = V_0 + V_c$ onde V_0 é a ordenada no ponto A e V_c o volume inicial da sonda. O ponto B indica o valor da pressão de fluência P_F e marca o final da fase elástica do solo.

Na última fase BC, onde o solo começa a deformar-se consideravelmente até atingir a rotura, a curva começa a ter uma assíntota na direcção vertical, definida a pressão limite, P_L , do solo.

De modo a definir os pontos da curva correspondentes a P_0 e P_F , é traçada uma curva de fluência (Figura 25) com base na variação volumétrica aos 30 e 60s em função da carga aplicada. A curva de fluência apresenta-se sob a forma de uma linha poligonal, na qual os vértices correspondem sensivelmente às diversas fases da curva pressiométrica.

A certa altura, na realização do ensaio, as diferenças de volume registadas aos 30 e 60s começam a ser mínimas, definindo um período durante o qual a variação é nula. Este período marca a fase elástica do solo, distinguindo os pontos A e B que correspondem à pressão inicial e de fluência respectivamente.

A partir do momento em que a diferença das leituras começa a sofrer variações, o solo entrou no regime plástico definido a partir do ponto B.

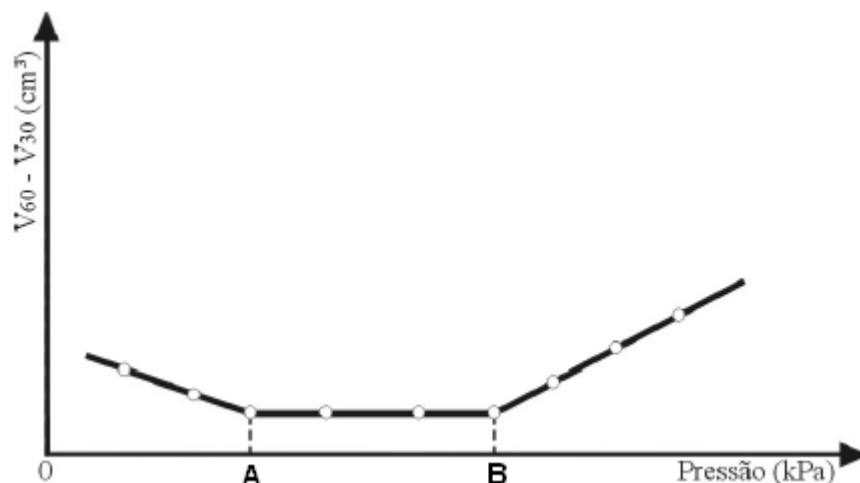


Figura 25 - Curva de fluência (Baguelin et al 1978)

3.5.1. Calibração

O pressiómetro, qualquer que seja o modo de inserção da sonda no terreno, é um ensaio que necessita de um rigoroso controlo de execução e de cuidadosos procedimentos de calibração, tendo em conta os factores que podem influenciar as medidas e assim obter resultados incorrectos.

Para calcular de forma correcta o comportamento tensão-deformação do solo, antes e após a realização de um ensaio pressiométrico, as perdas de pressão e volume devem ser calculadas.

A calibração (Mair e Wood, 1987) é a simulação de um ensaio real em condições bem conhecidas de modo a verificar o funcionamento do equipamento. O sucesso da interpretação de parâmetros geotécnicos a partir de dados de ensaio depende da possibilidade de obter pressões e volumes de referência, assim como assegurar uma medição correcta do comportamento tensão-deformação do material ensaiado. Uma calibração apropriada é indispensável num ensaio pressiométrico, e deve ser feita

antes e após a execução do mesmo. Esta serve para considerar a influência de factores como a variação de volume, as perdas de pressão e os erros dos próprios aparelhos e sensores.

Sendo assim após o operador montar o equipamento, ligar a sonda aos tubos e preencher os circuitos, duas calibrações devem ser efectuadas: as perdas de volume e pressão.

As perdas de pressão ocorrem devido à rigidez da membrana e as perdas de volume ocorrem devido à expansão das tubulações e compressibilidade de qualquer parte do equipamento, incluindo a sonda e o líquido. A calibração é realizada de forma a compensar os efeitos dessas perdas. O procedimento da calibração segue as recomendações estabelecidas na norma americana ASTM D4719 (1987) ou na norma francesa NF P94-110 (1991).

A calibração por perda de volume é feita inserindo a sonda dentro de um tubo de aço indeformável com diâmetro ligeiramente superior ao da sonda. Em seguida, a pressão é aumentada numa série de incrementos mantidos constantes durante 1 minuto, 10 estágios de 250 KPa, com o objectivo de traçar a curva de calibração.

Através da calibração da perda de volume (Figura 26), podemos obter o volume da célula central de medida V_s . Esse volume é dado pela expressão:

$$V_s = 0,5\pi L D_i^2 - V_0$$

Onde:

L = comprimento da célula central de medida ($L=21$ cm)

D_i = diâmetro interno do tubo de calibração

V_0 = volume necessário para que a sonda toque nas paredes do tubo.

O volume da célula central do pressiómetro é normalmente 535 cm^3 e é estimado pelo fabricante.

O incremento de pressão durante o procedimento do ensaio conduz também à expansão da tubulação que conduz a água da unidade de controlo à sonda, esta inércia volumétrica é contabilizada na medição da variação volumétrica da cavidade,

sendo determinada por ensaios com a sonda colocada no interior de um tubo metálico rígido, accionando-se depois a pressão de modo a constituir a curva de calibração.

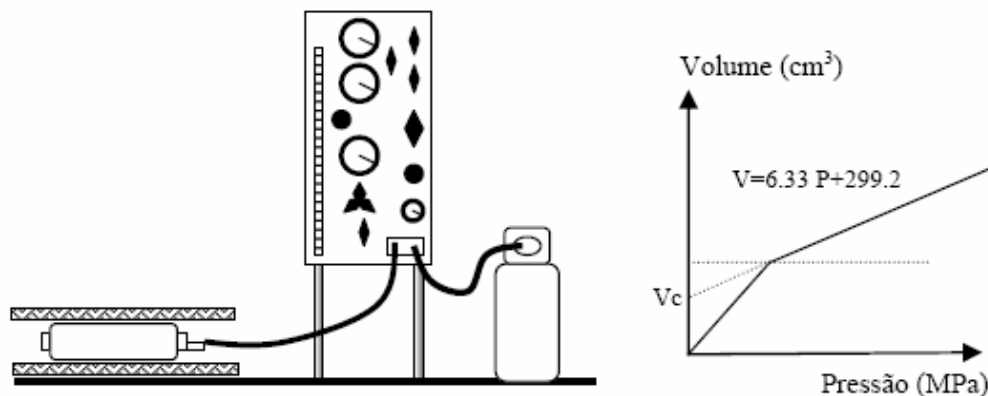


Figura 26 -Procedimentos para calibração da sonda: correcção do volume (Rodrigues, 2003)

No caso da perda de pressão (Figura 27), uma certa quantidade de pressão é necessária para expandir a sonda e superar a resistência da membrana. Deste modo a pressão aplicada ao solo é menor do que a pressão na sonda. Esta correcção é conhecida como resistência da membrana e corresponde à sua inércia a qual deverá ser subtraída aos valores de pressão registados durante o ensaio. O procedimento para correcção consiste em fazer expandir a sonda no vazio, onde toda a tubulação é saturada, aplicando dez estágios de pressão, até que seja atingido o volume máximo de expansão (700 cm^3).

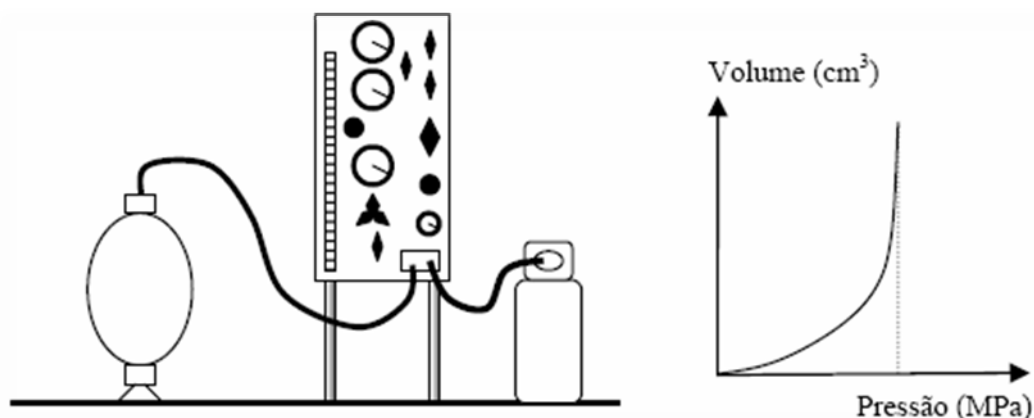


Figura 27 - Procedimentos para calibração da sonda: correcção da pressão (Rodrigues, 2003)

A Figura 28 apresenta curvas típicas de calibração obtidas com o pressiómetro Ménard. O volume V_c e a pressão P_c (pressão obtida através da calibração para perda de pressão) devem ser subtraídos aos valores lidos na unidade de controlo:

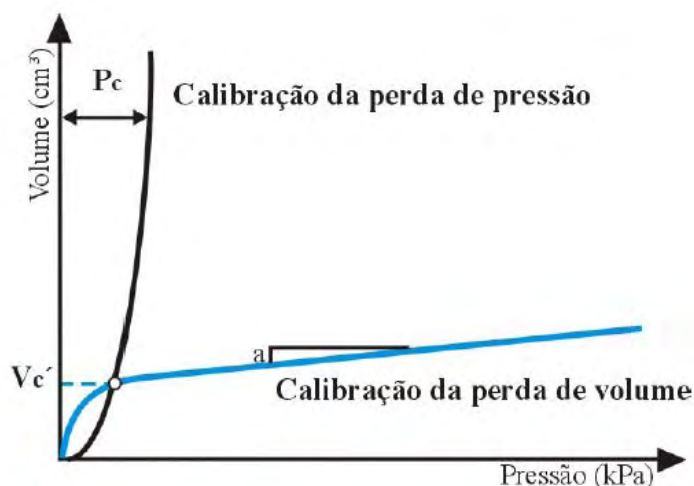


Figura 28 - Curvas de calibração da perda de volume e pressão (ASTM D4719-1987)

Pelo que:

$$V_c = a \cdot P_m$$

Onde:

a = coeficiente de compressibilidade do sistema ($\Delta V/\Delta P$) em cm^3/kPa

P_m = pressão lida no manómetro da unidade de controlo

É recomendada a realização de calibrações não apenas sempre que a sonda ou os tubos são trocados, mas como uma rotina básica pelo menos uma vez por dia ou até duas vezes por dia se grandes variações de temperatura ocorrem durante as horas de trabalho.

3.5.2. Correção da Curva

Os dados brutos obtidos dos ensaios pressiométricos precisam de correcção devido às perdas de volume e pressão descritas. Assim apenas os resultados corrigidos são representativos do comportamento do solo e apenas com eles é correcto calcular parâmetros.

Para além das calibrações apresentadas anteriormente, sempre que um ensaio é executado a determinada profundidade, as pressões lidas no manómetro devem ser acrescidas da carga devida ao peso da coluna de água compreendida entre a

superfície livre do reservatório de água na unidade controlo e o ponto médio da sonda pressiométrica (Figura 29).

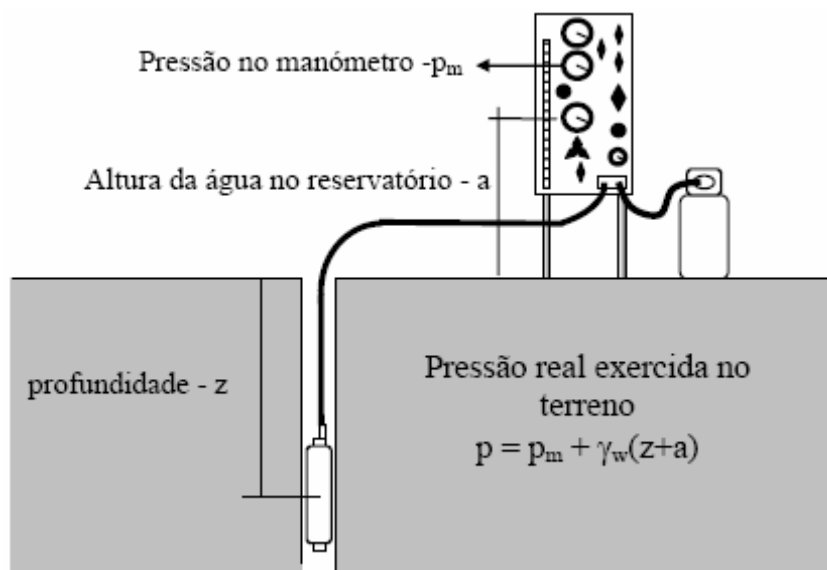


Figura 29 - Correção da altura piezométrica (Rodrigues, 2003)

A pressão real da sonda deve ser expressa por:

$$P = P_m + P_i - P_c$$

Onde:

P = Pressão aplicada ao solo

P_m = Pressão lida no manómetro da unidade de controlo

P_i = pressão hidrostática

P_c = pressão obtida através da calibração por perda de pressão

A pressão hidrostática é devida à diferença entre a altura do manómetro na unidade de controlo e a meia altura da célula central de medida e é dada por (Baguelin et al. 1978):

$$P_i = \gamma_w \Delta h$$

Onde:

γ_w = peso específico da água (9,8 KPa)

$\Delta_h = (z+a)$ altura entre o manómetro e o meio da célula de medida
Para obter os valores corrigidos do volume utiliza-se a expressão:

$$V = V_m - V_c$$

Onde:

V = volume aplicado à sonda

V_m = volume lido no volumímetro da unidade de controlo

V_c = volume devido às perdas de compressibilidade do sistema

3.6. Parâmetros e correlações do ensaio PMT

Após a realização do ensaio pressiométrico, através dos valores de pressão-volume obtidos traça-se a curva pressiométrica e determinam-se por via gráfica as seguintes grandezas características:

- 1) Pressão inicial e volume inicial (P_0, V_0)
- 2) Pressão de Fluência e Volume de Fluência (P_F, V_F)
- 3) Pressão Limite e Volume Limite (P_L, V_L)
- 4) Módulo Pressiométrico de Ménard (E_{PMT})

3.6.1. Parâmetros de ensaio

No seguimento dos conteúdos atrás descritos podem calcular-se os seguintes parâmetros de ensaio após a sua realização:

Pressão Inicial (P_0)

A pressão (P_0) corresponde à pressão necessária para a sonda entrar em contacto com as paredes do furo, não devendo ser confundida com a tensão inicial horizontal.

O ponto de coordenadas P_0 , V_0 indica o início de um traço rectilíneo (fase de comportamento elástico) da curva pressiométrica (Cestari, 1990).

Pressão de Fluência (P_F)

A pressão de fluência é a pressão correspondente ao ponto final da fase elástica na curva pressiométrica, ou seja é a pressão correspondente ao início do escoamento do solo. O valor de P_F é retirado da curva de fluência que é obtida no gráfico de variação de volume ocorrido entre as leituras de 30 e 60 segundos versus a pressão aplicada.

Pressão Limite (P_L) e Pressão Limite Efectiva (P_L')

A pressão limite é definida como a pressão alcançada para conseguir a expansão infinita de um cilindro. Como esta não pode ser alcançada durante o ensaio, é definida como a pressão alcançada quando o volume da cavidade tiver duas vezes o seu tamanho inicial ($\Delta V/V=1$) (Briaud, 1992). No entanto, frequentemente o valor desta pressão limite não é atingido, sendo a sua determinação realizada através de extrapolação (Bosch et al., 1997).

Numa cavidade que se expande, a pressão limite corresponde a uma deformação infinita (rotura), que pode ser determinada directamente da curva pressiométrica corrigida, como a abcissa da assíptota da curva na fase plástica.

Quando não é atingida directamente da curva pressiométrica utiliza-se um gráfico em escala semi-logarítmica, relacionando o logaritmo do volume e a pressão. Com pelo menos três pontos da fase plástica traça-se uma recta cujo prolongamento até à ordenada, equivale ao dobro do volume inicial da célula de medida, indicando o valor da pressão limite.

Segundo Cestari (1990), considerando uma escala logarítmica a expansão da cavidade vem:

$$\log_e \frac{\Delta V}{V}$$

Onde:

V = volume da cavidade ($\Delta V + (V_0 + V_i)$)

V_s = volume inicial da sonda (à pressão atmosférica)

V_0 = volume necessário para expandir a sonda até as paredes do furo

ΔV = incremento de volume da cavidade por efeito da expansão

A pressão limite corresponde na curva pressiométrica ao valor onde $\frac{\Delta V}{V} = 1$ e na prática é habitualmente calculada através de dois métodos:

1. Método de Ménard

Por convenção a pressão limite P_L é aquela que corresponde a volume limite V_L a partir do qual se atinge o dobro do volume inicial (Figura 30). Assim o volume limite expresso por:

$$V_L = V_s + 2V_0$$

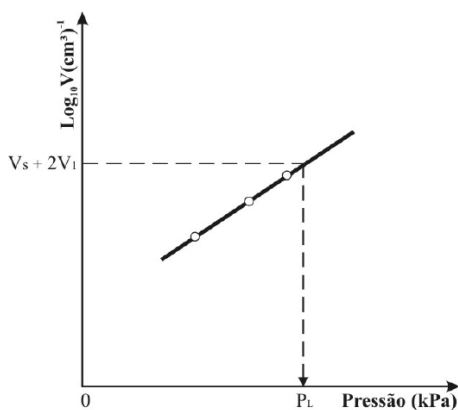


Figura 30 - Método de Estimativa da Pressão limite

2. Método da recta $\frac{\Delta V}{V} = 1$

Traçando um gráfico com os valores corrigidos de pressão e volumes expressos em escala logarítmica ($P \times \log_{10} \frac{\Delta V}{V}$) obtêm-se uma curva pressiométrica com um traço

inicial curvilíneo e uma assíntota que tende para o valor $\log_e \frac{\Delta V}{V} = 1$, ficando assim a conhecer-se a pressão limite.

A pressão limite efectiva P_L' é um parâmetro relativo à resistência do solo é é definida segundo a equação seguinte tendo em conta a tensão horizontal de repouso do solo e a pressão limite.

$$P_L' = P_L - \sigma_{h0}$$

Módulo Pressiométrico de Ménard (E_{PMT})

O módulo pressiométrico E_{PMT} traduz a deformabilidade do solo quando sujeito a carregamento. Caracteriza a fase pseudo-elástica do ensaio e é essencial para o cálculo de assentamentos em fundações.

É calculado através de valores da fase elástica da curva tensão-deformação corrigida (Figura 31) e é dado pela equação:

$$E = 2(1 + \nu) V_m \frac{(P_F - P_0)}{(V_F - V_0)}$$

Com:

$$V_m = V_s + \frac{V_0 + V_F}{2}$$

Onde:

ν = Coeficiente de Poisson

V_m = volume médio da cavidade

P_0 e P_F = pressão medida no início e final da fase elástica respectivamente

V_0 e V_F = volume medido no início e final da fase elástica respectivamente

V_s = volume da célula central de medida

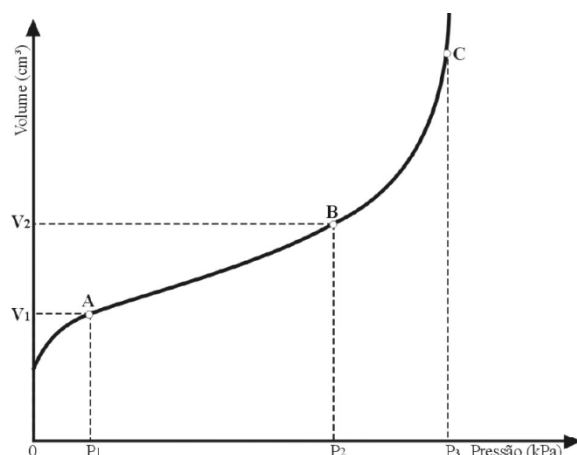


Figura 31 - Curva pressiométrica corrigida (ASTM D4719-1987; NF P94-110 1991)

Ménard (1975) recomenda que seja utilizado sempre um valor constante para o coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,33 para todos os tipos de solo no cálculo do módulo pressiométrico. Segundo Briaud (1992), para argilas este valor não é recomendado pois estas têm um comportamento não drenado adoptando-se neste caso um valor de 0,50.

Segundo Rodrigues (2003), o valor do módulo pressiométrico é afectado por uma série de efeitos, que condicionam a sua utilização quando comparados com o valor do módulo de Young (E), utilizado normalmente no dimensionamento de fundações, dos quais se podem destacar os seguintes:

- E_{PMT} é obtido num contexto de deformações variadas que podem englobar zonas fortemente plastificadas.
- É calculado em extensão, admitindo valores equivalentes em estados de tensão compressão e extensão, o que normalmente não acontece na natureza.
- O valor é fortemente influenciado pelos inevitáveis efeitos perturbadores pela forma como é instalada a sonda na cavidade.

A existência destes efeitos impede que se proceda à avaliação directa de parâmetros mecânicos dos solos ensaiados, sendo normal a utilização de vias semi-empíricas de abordagem para determinação desses parâmetros. Amar et al. (1991) referem que o módulo de Ménard é afectado pela perturbação inerente ao processo de abertura da cavidade e pela resposta inelástica durante a expansão da cavidade, pelo que este parâmetro não deve ser considerado uma propriedade fundamental do solo, nem deverá ser utilizado directamente em soluções elásticas.

Este assunto será abordado mais à frente quando se introduzir a correlação entre o módulo de Ménard e o módulo de Young (E). Parâmetros Geotécnicos

Através do ensaio pressiométrico de Ménard podem avaliar-se os seguintes parâmetros geotécnicos relacionados com a resistência e deformabilidade dos solos:

- Tensão horizontal de repouso σ_{h0}
- Módulo de Distorção G
- Módulo de Deformabilidade E
- Coesão não drenada C_u
- Ângulo de atrito interno Φ e dilatância ψ

Tensão horizontal de repouso σ_{h0}

É reconhecida a dificuldade na obtenção da tensão horizontal *in situ* por meio de ensaios com o pressiómetro de Ménard. A sua identificação requer interpretação de dados da curva pressiométrica a partir de critérios ainda não validados (Schnaid et al., 1995). A tensão horizontal de repouso deve ser feita com bastante cuidado, tendo em conta que este é um dos parâmetros geotécnicos mais subjectivos que podem ser obtidos a partir de um ensaio pressiométrico. Essa subjectividade ocorre devido ao grau de perturbação nas paredes da cavidade durante a perfuração, à diferença entre o diâmetro do furo e o da sonda, ao alívio de tensões logo após a abertura da cavidade e ao insuficiente número de pontos na fase inicial da curva (Furtado, 1998). Em geral, a perturbação resultante dos efeitos da instalação da sonda aumenta com o aumento da rigidez e granulometria dos solos, pelo que a eficiência da avaliação da tensão horizontal é menor nos solos rijos do que nos solos lodosos, e pode tornar-se inconsistente nos solos saturados (Clarke, 1995; Gambin, 1980).

Sandroni e Brandt (1983) afirmam que o ensaio pressiométrico é um instrumento viável para a obtenção de tensões horizontais *in situ*, de características tensão-deformação e da resistência à distorção, enquanto Schnaid et al. (1995) e Cestari (1990) consideram que a dedução deste parâmetro através do PMT é pouco fiável.

Módulo de distorção (G)

O módulo de distorção de uma argila é uma medida do seu comportamento elástico e a partir do seu cálculo é estimado o módulo de deformabilidade.

Segundo Cestari (1990), pode ser estimado numa fase inicial da curva pressão-deformação através de uma tangente de declive G_i . No entanto resultados mais correctos são obtidos pelo cálculo numa fase de comportamento perfeitamente elástico num ciclo de carga/descarga através da tangente de declive G_{ur} (Figura 32). Assim assegura-se o cálculo com valores da fase elástica. Os valores iniciais podem induzir em erro pois as deformações podem estar a ocorrer nas paredes já perturbadas aquando a realização do furo. Assim, numa fase posterior garante-se que essa perturbação inicial não afecta o cálculo.

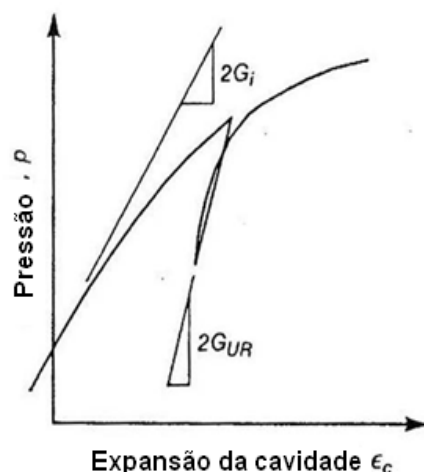


Figura 32 - Determinação do módulo inicial tangente da curva pressão/ expansão da cavidade (Mair e Wood, 1987).

O módulo de distorção pressiométrico G é também obtido através de uma variação de volume específica segundo a expressão proposta por Lamé (1952):

$$G = V_m \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

Onde:

ΔV = variação de volume na fase elástica devido ao aumento de pressão ΔP

V_m = volume inicial da sonda acrescido do volume médio expandido

Tal como o módulo pressiométrico de Ménard, o módulo de distorção G é determinado com valores de pressão e volume obtidos durante a fase elástica da curva pressiométrica corrigida.

A relação entre os dois é dada pela equação:

$$G = \frac{E_{PMT}}{2(1 + \nu)}$$

Como Ménard sugere o coeficiente de Poisson $\nu=0,33$ a expressão pode ser reescrita:

$$G = \frac{E_{PMT}}{2,66}$$

Módulo de deformabilidade (E , E_{oed})

O módulo de Young ou de elasticidade E é calculado através da expressão:

$$E = \frac{E_{PMT}}{\alpha_p}$$

Onde α_p é um parâmetro que é determinado pela Tabela 4.

Tabela 4 - Determinação do parâmetro α , factores reológicos para vários tipos de solo. (adaptado de Clarke, 1995)

Tipo de Solo	Descrição	E_{PMT}/PL	α
Turfas	-	-	1
Argilas	Pré-Consolidadas	>16	1
	Normalmente Consolidadas	9-16	0.67
	Consolidadas	7-9	0.5
Siltes	Pré-Consolidadas	>14	0.67
	Normalmente Consolidadas	8-14	0.5
Areias	-	>12	0.5
	-	7-12	0.33
Areias e Pedregulhos	-	>10	0.33
	-	6-10	0.25
Rochas	Muito Fracturadas	-	0.33
	Sãs ou intactas	-	0.5
	Alteradas	-	0.67

O módulo pressiométrico pode ainda ser relacionado com o módulo confinado E_{oed} :

$$E_{oed} = E_{PMT}/\alpha$$

Onde α é um factor de correlacção que depende do tipo de solo, conforme proposto Ménard & Rousseau (1962) na tabela seguinte.

Tabela 5 - Relação entre E_{PMT} e E_{OD} para solos normalmente consolidados (Ménard & Rousseau 1962). $E_{oed} = E_{PMT}/\alpha$

Tipo de Solo	Argila	Silte	Areia	Cascalho
α	0.67	0.50	0.33	0.25

Coesão não drenada (C_u)

O valor da coesão não drenada de uma argila não é um valor intrínseco a um dado terreno, depende das condições do meio em que se encontra. Assim, os valores de resistência medidos com o ensaio pressiométrico devem ser comparados com os valores de laboratório em iguais condições de deformação (Cestari, 1990).

Considerando uma curva de tensão-deformação onde se ilustra o comportamento da coesão não drenada (Figura 33), pode ser diferenciada uma fase em que a coesão tem um valor máximo (pico), quando a deformação ainda não atingiu valores definitivos, e uma fase em que a coesão passou a ter um valor residual, onde as deformações já afectaram a força de ligação entre partículas.

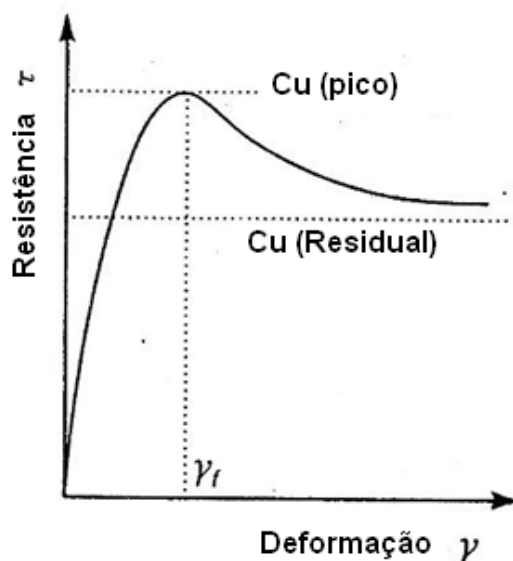


Figura 33 - Comportamento da coesão não drenada com a deformação (Mair e Wood, 1987)

Uma estimativa do valor da coesão não drenada através de um ensaio PMT pode ser feita tendo em conta o método Gibson & Anderson (1961), onde se considera o declive da recta obtida pelo gráfico pressão versus deformação volumétrica em escala logarítmica.

No cálculo da coesão não drenada através do declive da curva $P \times \text{Log}_e (\Delta V/V)$ a deformação volumétrica é dada por:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_m - V_0}{V_s + V_0 + V_m}$$

Onde:

V_s = volume inicial da sonda

V_0 = Volume no início da fase elástica

V_m = volume medido na unidade de controlo

O declive da recta que melhor aproxima os pontos dá o valor da coesão não drenada.

Através da curva observam-se fases com resistências menores a grandes deformações sendo caracterizadas por um valor máximo (de pico) e um valor mínimo (residual). A Figura 34 evidencia a obtenção dos valores de C_u de pico e C_u residual.

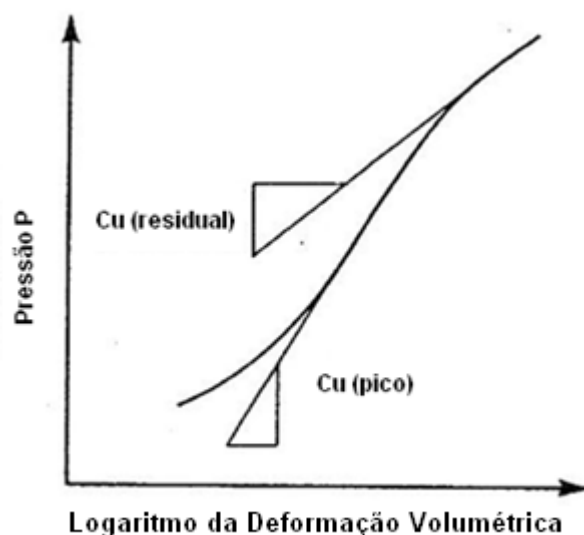


Figura 34 - Cálculo da coesão não drenada pelo declive da curva $P \times \ln(\Delta V/V)$ (Mair e Wood, 1987)

Amar e Jézéquel (1972) apresentam uma proposta alternativa para determinação deste parâmetro em solos argilosos baseada na pressão limite e tensão horizontal de repouso conforme a tabela seguinte.

Tabela 6 - Relação entre PL e Cu em argilas (Amar & Jézéquel 1972)

PL - σ_{h0} (kPa)	Cu (kPa)
<300	$(PL - \sigma_{h0}) / 5.5$
>300	$((PL - \sigma_{h0})/10)+25$

Ângulo de atrito interno (Φ) e dilatância (ψ)

Os ensaios pressiométricos permitem também o cálculo do ângulo de atrito interno e de dilatância. Clarke (1995) indica o modelo desenvolvido por Hughes et al (1977), com a utilização dos factores de correcção propostos por Fhaey e Randolph (1984), que admite um comportamento elástico até a rotura, a qual se processa com ângulos de atrito e dilatância constantes.

O seu cálculo é efectuado através de um gráfico que relaciona o logaritmo da pressão efectiva com a expansão da cavidade, e através do seu declive s vem:

$$\text{sen}(\phi) = \frac{s}{(1 + (s - 1) * \text{sen}\phi_{cv})}$$

$$\text{sen}(\psi) = s + (s - 1) * \text{sen}\phi_{cv}$$

Onde:

Φ = ângulo de atrito

Ψ = ângulo de dilatação

Φ_{cv} = ângulo de atrito a volume constante (Tabela 7)

s = declive da curva $\ln(P-u_0) / \ln \epsilon_c$

O ângulo de atrito a volume constante é um valor estimado em função do tipo de solo, conforme a tabela de valores indicativos do Φ_{cv} para solos granulares (Hough, 1957).

Tabela 7 - Valores indicativos dos ângulos de atrito de pico e volume constante de solos granulares

Tipo de Solo	Φ_{cv}	Φ	
		Medianamente Compacto	Compacto
Silte (não plástico)	26	28	30
Areias finas a médias mal graduadas	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Areias bem graduadas	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Areias e Cascalhos	32 a 36	36 a 42	40 a 48

A expansão da cavidade cilíndrica da sonda no furo e respectiva deformação associada pode ser conhecida através do cálculo do volume do cilindro (Figura 35). Sabendo o volume (V) correspondente a uma dada deformação e o comprimento da sonda (h) pode assim obter-se o raio para o qual se deu a expansão conhecendo a relação matemática:

$$V = \pi r^2 h$$

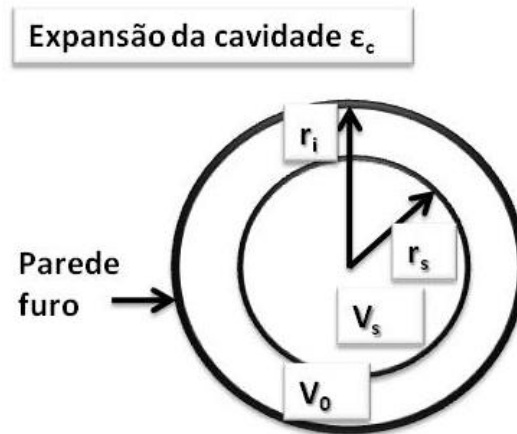


Figura 35 - Representação da expansão da cavidade cilíndrica.

Assim temos que:

$$r_i = \sqrt{\frac{(V_s + V_0)}{L_0 * \pi}}$$

Onde:

r_i = raio do cilindro no volume inicial.

V_s = volume inicial da sonda

V_0 = Volume no início da fase elástica

L_0 = Comprimento da sonda

Através da relação anterior pode ser obtido o raio da cavidade a cada patamar de pressão aplicado ao longo da execução do ensaio:

$$r = \sqrt{\frac{(V_s + V_{s0})}{L_0 * \pi}}$$

Chegando finalmente à expressão da expansão da cavidade associado a cada patamar de tensão:

$$\varepsilon_c = \frac{(r - r_i)}{r_i}$$

O cálculo do ângulo de atrito e de dilatância implica o traçado de um gráfico relacionando o logaritmo da expansão da cavidade descrita e o logaritmo da pressão efectiva (Figura 36) sendo esta última a uma relação entre a pressão total e a pressão neutra:

$$P' = P - u_0$$

$$u_0 = (Z - NF) * \gamma_w$$

Onde:

γ_w = Peso volúmico da água

u_0 = pressão neutra

z (m) = profundidade do ensaio

NF = nível freático

P' = Pressão Efectiva

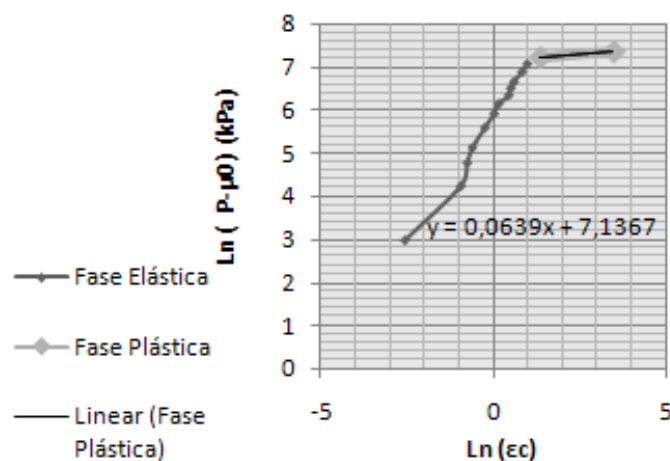


Figura 36 - Curva $\ln(P-u_0) / \ln \epsilon_c$

3.7. Identificação do tipo de solo através de parâmetros pressiométricos.

Ménard (1975) afirma que para cada formação geológica há uma relação constante entre o módulo pressiométrico E_{PMT} e a pressão limite do solo P_L . Estas relações em conjunto com a identificação visual do solo na execução do furo fornecem uma indicação do tipo de solo, e seu estado de compacidade-consistência. Na Tabela 8 apresentam-se intervalos de valores que podem ser usados para identificar o tipo de solo através dos dados pressiométricos, conforme proposta de Ménard (1975).

Tabela 8 - Valores típicos de E_{PMT} e P_L e da relação E_{PMT}/P_L para vários tipos de solo (Ménard, 1975)

Tipo de Solo	E_{PMT} (Kpa)	P_L (Kpa)	E_{PMT}/P_L
Lama/Turfa	200-1.500	20-150	10
Argila Mole	500-3.000	50-300	10
Argila Média	3.000-8.000	300-800	10
Argila Rija	8.000-40.000	600-2.000	13-20
Argila Muito Rija	5.000-60.000	600-4.000	8-15
Argila Siltosa fofa	500-2.000	100-500	4-5
Silte Puro	2.000-10.000	200-1.500	6.7-10
Areia Compacta	8.000-40.000	1.200-5.000	6.7-8
Areias Sedimentares	7.500-40.000	1.000-5.000	7.5-8
Pedra Calcária	80.000-20.000.000	3.000-10.000	26.7-2.000
Aterros jovens	500-5.000	50-300	10-16.7
Aterros Velhos	4.000-15.000	400-1.000	10-15

3.7.1. Aplicações do pressiómetro de Ménard em projectos de Fundações Superficiais

O pressiómetro de Ménard pode ser usado em investigações *in situ* para aplicar em todos os tipos de projectos de fundações. Assim fórmulas semi-empíricas foram desenvolvidas baseadas quer em fundamentos teóricos quer em observações de comportamento de fundações.

Capacidade de carga ou carga de rotura (q)

Denomina-se capacidade de carga ou tensão de rotura, a tensão que aplicada ao solo mediante uma força actuante que causa a sua rotura.

Ménard (1963) apresentou uma proposta para o cálculo da tensão admissível, a qual é baseada em valores da pressão de inicial e de fluência, e ábacos que relacionam a

profundidade de encastramento e a dimensão característica da fundação. A teoria da elasticidade envolve o conceito de profundidade crítica, que constitui uma fronteira a partir da qual as pressões limite esférica e cilíndrica são constantes.

Para qualquer tipo de fundação carregada verticalmente a capacidade de carga q , é dada por:

$$q = K_g (p_L + \sigma_{h0}) + \sigma_{v0}$$

Onde:

q = capacidade de carga

K_g = coeficiente de capacidade de carga

σ_{v0} = tensão vertical

$(p_L + \sigma_{h0})$ = pressão limite efectiva p_L'

O coeficiente de capacidade carga pode ser expresso por um factor pressiométrico de capacidade de carga K_g (Briaud, 1992).

$$K_g = \frac{p_L(\text{esférica})}{p_L(\text{cilíndrica})}$$

A determinação deste coeficiente pode ser realizada com auxílio do ábaco da Figura 37 e da Tabela 9 para fundações superficiais e da Tabela 10 para fundações profundas, este varia com o tamanho da fundação, a profundidade e o tipo de solo.

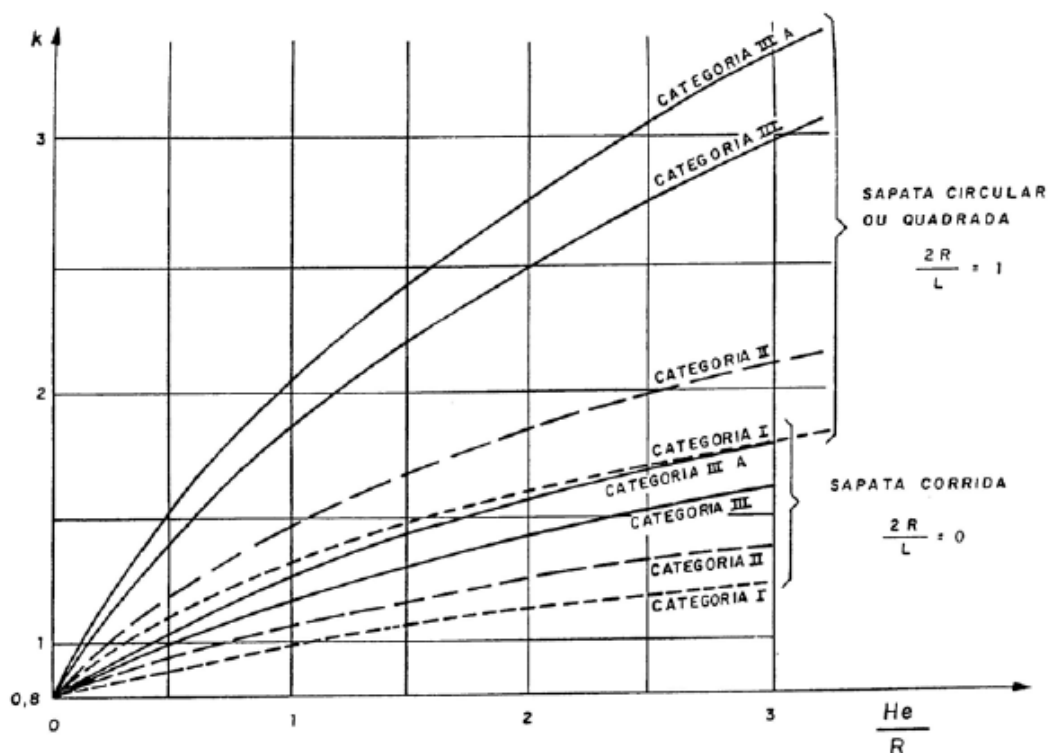


Figura 37 - Valores do Coeficiente de capacidade de K_g para fundações superficiais. (Ménard, 1963)

Tabela 9 - Classificação do solo em categorias segundo Ménard (1975).

Pressão Limite (kPa)	Tipo de Solo	Categoria
0-1200 0-700	Argila Silte	I
1800-4000 1200-3000 400-800 1000-3000	Argila Rija ou Marga Silte Compacto Areia Compressível Rocha Branda ou Alterada	II
1000-2000 4000-10000	Areia e Pedregulho Rocha	III
3000-6000	Areia e pedregulho muito compacto	III - A

Tabela 10 - Coeficiente de Capacidade de Carga K_g para fundações profundas (Vesic, 1975).

Tipo de Solo	Categoria	Profundidade Crítica		K_g máximo	
		Fundação Isolada	Fundação Contínua	Estaca moldada	Estaca Cravada
Argila, Silte	I	$2B_e$	$3B_e$	1.2	1.8
Areia e Cascalho	II	$5B_e$	$6B_e$	1.1	3.2-4.2
Gesso	III	$8B_e$	$9B_e$	1.8	2.6
Rocha fraca	IV	$8B_e$	$9B_e$	1.1-1.8	1.8-3.2

Assentamentos (s)

O assentamento de fundações pode ser estimado a partir do ensaio pressiométrico tendo em conta o facto de que do ensaio resulta não directamente o módulo de Young, mas um módulo pressiométrico calculado tendo em conta os parâmetros de deformabilidade do solo, relacionável com o módulo E_{oed} .

Segundo Ménard e Rosseau (1962), o assentamento total de uma fundação plana quadrada de lado (B) e assente à profundidade (D), em solo homogéneo, pode ser calculado através da seguinte equação:

$$s = \underbrace{\frac{2qB_0}{9E_d} \left(\lambda_d \frac{D}{B_0} \right)^\alpha}_{\text{Assentamento Desviatório}} + \underbrace{\frac{\lambda_d q D}{9E_c}}_{\text{Assentamento Esférico}}$$

Onde:

s = assentamento (m)

q = carga aplicada (Mpa)

E_c, E_d = módulo pressiométrico de Ménard (Mpa)

B_0 = largura do pressiómetro (0,16m)

B = largura de fundação (m)

$\lambda_d, \lambda_c, \alpha_p$ = parâmetros a obter da Figura 38, Tabela 11 e Tabela 4 respectivamente.

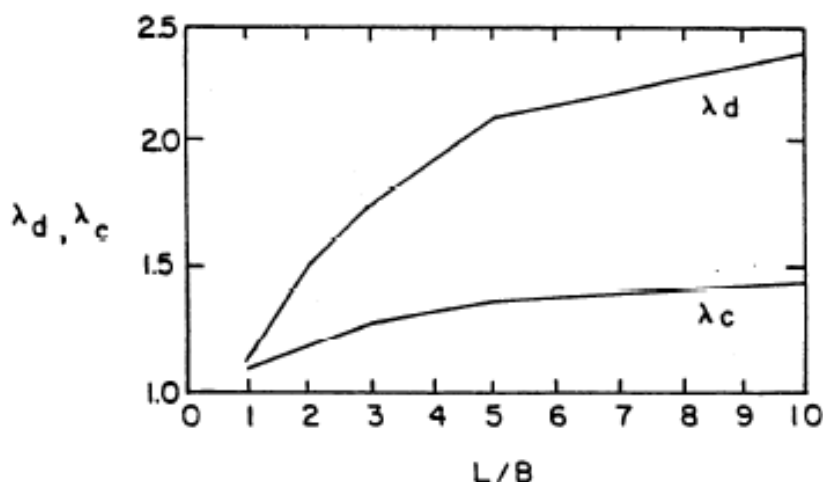
Figura 38- Gráfico para determinação de λ_d e λ_c (Ménard, 1975)

Tabela 11 - Tabela 1. Factor forma segundo Baquelin et al. (1986)

Relação L/B	1		2	3	5	20
	Circular	Quadrada				
λ_d	1	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65
λ_c	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5

A maioria dos depósitos de solo natural são homogêneos e o módulo Pressiométrico varia com a profundidade. Se a medida do módulo pressiométrico de uma proposta fundação variar mais do que 30%, é recomendado que o assentamento do local seja calculado com base num módulo equivalente determinado abaixo:

O solo abaixo da base da fundação é dividido em 16 camadas, cada uma com espessura $R=B/2$, as camadas localizadas entre $(i-1)R$ e iR , o módulo pressiométrico medido a essa profundidade será E_i (média dos valores de E_{PMT} medidos).

Os módulos E_c , E_d para a expressão de cálculo do assentamento serão dados por:

$E_c = E_1$, onde E_c será o valor de E_{PMT} na camada número 1 imediatamente abaixo da base de fundação.

$$\frac{1}{E_d} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{0.82E_2} + \frac{1}{E_3/4/3} + \frac{1}{2.5E_5/7/2} + \frac{1}{2.5E_9/16} \right], \text{ onde } E_{p/q} \text{ é média dos módulos das camadas p e q.}$$

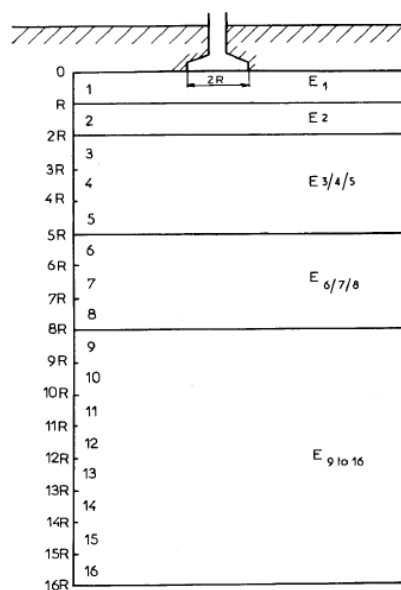


Figura 39 - Divisão do solo em camadas de modo a calcular o módulo E (Sols Soils, 1975)

Nos casos em que se verifique a existência de uma camada intermédia de espessura mais fina, bastante compressível é preferível efectuar o cálculo separado da camada compressível (s'') e do restante maciço (s') sendo o assentamento total a soma dos dois (Figura 40).

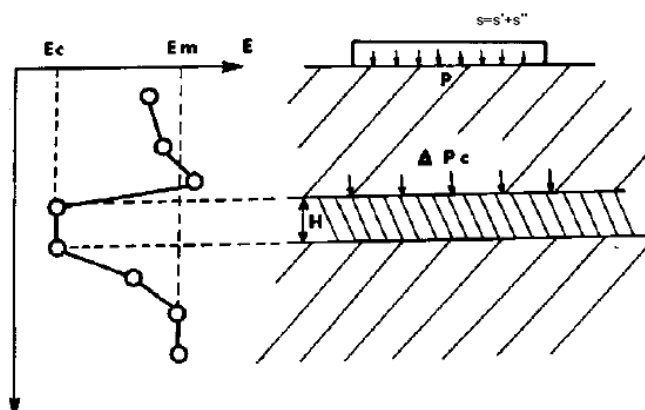


Figura 40 - Módulo pressiométrico para cálculo de assentamentos (Sols Soils, 1975)

Capítulo 4.

PRECISÃO NAS MEDIÇÕES

4. PRECISÃO NAS MEDIÇÕES

4.1. Introdução

O erro é inerente ao próprio processo de medida, isto é, nunca será completamente eliminado. Poderá ser minimizado procurando-se eliminar o máximo possível as fontes de erros. Assim, ao realizar medidas, é necessário avaliar quantitativamente os erros cometidos.

O acto de medir é, em essência, um acto de comparar, e essa comparação envolve erros de diversas origens (dos instrumentos, do operador, do processos de medida etc.). Os erros de medição estão inevitavelmente presentes nas observações feitas pelo homem. Estes podem não decorrer apenas de falha humana mas também da imperfeição do equipamento. Assim surge a palavra incerteza que expressa a dúvida na validade do resultado de uma medição e que consiste em vários componentes que podem ser agrupados em duas categorias gerais:

- Os que podem ser avaliados com métodos estatísticos
- Os que necessitam de outros meios

Estudam-se assim os erros e suas consequências, de modo aferir a representatividade da medição.

O valor de uma grandeza submetida a medição é normalmente adquirido através de um procedimento que envolve um instrumento de medição. O próprio processo de medição e o instrumento utilizado têm limites de precisão e exactidão, ou seja, toda a medição realizada tem associada uma incerteza.

A selecção do processo de medição do instrumento utilizado e a reprodutibilidade da grandeza medida têm que ser expressas de alguma forma. Em alguns aparelhos a incerteza do instrumento já vem marcada no painel ou no manual, caso contrário a metade da menor divisão da escala é a considerada. Nada sabemos sobre a reprodutibilidade do processo de medição, assim a incerteza é importante na hora de comparar resultados.

No entanto, é razoável admitir que existe um valor exacto, embora desconhecido, e que é possível estimar limites do intervalo em que ele se encontra. O cálculo da

incerteza associada a uma medição permite avaliar o intervalo de confiança dos resultados obtidos.

4.2. Estimativa de erros

O conhecimento do intervalo de variação de uma leitura efectuada é a estimativa do erro associado à medição. Assim, na medição de uma grandeza não é esperado obter um valor exactamente igual ao verdadeiro, mas sim um aproximado, sendo importante a indicação sobre a aproximação ao valor verdadeiro, isto é, indicação da precisão ou do grau de confiança do valor medido. O conhecimento da ordem de grandeza do erro indica qual o intervalo de variação (intervalo de incerteza ou confiança) da leitura.

Num aparelho digital, que fornece resultados discretos separados por um determinado valor mínimo, define-se como o seu erro de leitura a separação referida. Por exemplo, uma balança digital que forneça resultados até à décima grama, não pode apresentar resultados que considerem menor de 0,1g.

Por outro lado, um aparelho analógico tem uma escala que pode ser lida de forma contínua. O erro da sua leitura (

Tabela 12) é,

Valor Medido (mm)	Erro de Leitura (mm)	Resultado Final (mm)	Intervalo de Confiança
10,5	0,5	$10,5 \pm 0,5$	10 - 11
127,0	0,5	$127,0 \pm 0,5$	126,5 – 127,5

geralmente, o valor da menor divisão da sua escala. No entanto, se o operador conseguir ler fracções da menor divisão da escala, essa fracção é o erro de leitura. Considerando por exemplo, uma régua onde a divisão mínima é 1mm, se o operador interpolar distancias que sejam fracção de 1mm (0,5mm), então o erro de leitura é 0,5mm. Assim os comprimentos medidos pelo observador vão até às décimas de milímetro. (Mendonça, 2000)

Tabela 12 - Exemplos de leituras e erros associados

Valor Medido (mm)	Erro de Leitura (mm)	Resultado Final (mm)	Intervalo de Confiança
10,5	0,5	$10,5 \pm 0,5$	10 - 11
127,0	0,5	$127,0 \pm 0,5$	126,5 – 127,5

Quando o fabricante do aparelho fornece a informação acerca do erro do aparelho (relacionado com as imperfeições dos componentes, procedimento de calibração, etc.) este erro tem que ser adicionado ao erro de leitura. (Tabela 13)

Tabela 13 - Erros de Medição e Erros de Fabrico

Valor Medido (mm)	Erro de Leitura (mm)	Erro de Fabrico (mm)	Resultado Final (mm)	Intervalo de Confiança
10,5	0,5	0,25	$10,5 \pm 0,75$	9,75 – 10,25
127,0	0,5	0,25	$127,0 \pm 0,75$	126,25 – 127,75

4.3. Tipos de Erro

Por mais cuidadosa que seja uma medição e por mais preciso que seja o instrumento, não é possível realizar uma medida directa perfeita. Ou seja, existe sempre uma incerteza associada ao resultado ao comparar uma quantidade de uma dada grandeza física com a sua unidade.

Na maioria dos casos, todo o tipo de medições está associado a pelo menos um tipo de erro, e estes podem ser classificados segundo a sua natureza em:

- Grosseiros
- Sistemáticos
- Acidentais ou Aleatórios
- Outros Erros

4.3.1. Erros Grosseiros

Os erros grosseiros podem ser provocados por falhas ocasionais dos instrumentos, do observador ou de outros intervenientes, ocorrem devido à falta de prática ou distração do operador. Geralmente é fácil detecta-los pois resultam em medições fora do esperado e consistem numa escolha errada de escalas, erros de cálculo, erros de leitura, etc.

Os erros grosseiros afectam significativamente a eficácia de qualquer aplicação industrial que use os dados de processo, assim estes devem ser detectados e removidos. Devem ser evitados pela repetição cuidadosa das medições.

É conveniente desenvolver métodos de redução de erro de modo a melhorar resultados.

4.3.2. Erros Sistemáticos

Os erros sistemáticos são causados por fontes possíveis de identificar, e geralmente podem ser compensados ou eliminados.

Estes caracterizam-se pelo facto de afectarem os resultados sempre no mesmo sentido, isto é, medidas acima ou abaixo do valor real, prejudicando a exactidão da leitura.

Existem muitos factores responsáveis pelos erros de leitura sistemáticos, tais como erros de paralaxe, de escalas dificilmente estabelecidas, de aparelhos não calibrados, tempo de resposta do operador, etc.

4.3.3. Erros Acidentais ou Aleatórios

Os erros aleatórios ou acidentais são devidos a causas diversas, bem como a causas temporais que variam durante observações sucessivas e que escapam a uma análise dada a sua imprevisibilidade. As suas origens são provenientes de causas indeterminadas, temporárias, variáveis e imprevisíveis que modificam de maneira irregular as medições. Os erros acidentais são inevitáveis, não podem ser eliminados e não são completamente corrigíveis.

A teoria dos erros fundamentada no cálculo de probabilidades trata dos erros acidentais, de toda a sua influência nos resultados das leituras e consequências associadas.

4.3.4. Outros Erros

Alem dos três tipos de erros referidos, que estão directamente ligados com o acto de medição, ou seja, com a experiência, é importante mencionar também os erros relacionados com o tratamento de dados:

- Erros nos dados experimentais

São erros que resultam de calibração deficiente (erro do tipo sistemático) e/ou de deficiências na realização do ensaio.

- Erros de Truncatura

Os erros de truncatura estão relacionados com aproximações de modelos matemáticos usados para responder a um dado problema. Esses modelos envolvem, usando álgebra ou análise, sequências infinitas de operações aritméticas. Devido às limitações de hardware disponíveis para efectuar cálculos numéricos, as séries infinitas são aproximadas por séries finitas e são truncadas. Daqui resulta um erro designado erro de truncatura.

- Erros de Arredondamento

Os erros de arredondamento estão relacionados com a execução das operações aritméticas de um dado problema. Resultam da representação de números reais com um número finito de algarismos significativos. Este tipo de erro é comum já que os equipamentos de cálculo normalmente utilizados funcionam em dupla precisão, o que corresponde à utilização por parte do software de aproximadamente 15 algarismos significativos.

4.4. Erros no ensaio PMT

Tendo em conta informações do manual EPRI (1990), o ensaio pressiométrico encerra inúmeras fontes de erro, principalmente pela sua natureza complexa em relação ao equipamento e procedimento. A calibração do equipamento, as perdas de pressão e volume, a preparação do furo, inserção da sonda, necessidade de prévio conhecimento do tipo de solo e a interpretação do ensaio são geralmente fontes de erro com impactos variados. Assim apenas operadores experientes devem proceder a realização de um ensaio pressiométrico.

Além disso, os valores de resistência e deformação obtidos com o ensaio PMT não são directamente comparáveis aos valores obtidos por outros ensaios "*in situ*".

Na Tabela 14, Orchant et al, (1988), evidencia as perturbações com efeitos significativos na qualidade dos resultados.

Tabela 14 - Perturbações no ensaio pressiométrico de Ménard (Orchant et al, 1988)

Variável	Efeito nos resultados do ensaio
Expansão da tubulação	Baixo
Perdas por atrito na tubulação	Baixo
Dimensões da sonda	Baixo - Moderado
Intervalo de expansão da sonda	Baixo - Moderado
Método de furação e preparação do furo	Significativo
Método de inserção da sonda	Significativo
Tamanho do furo	Significativo
Idade da Membrana	Baixo
Perdas de Carga nas linhas de condução	Baixo

4.4.1. Precisão do equipamento

4.4.1.1. Precisão dos manómetros e volumímetros

As leituras de pressão e volume obtidas com o Pressiómetro de Ménard, são obtidas através de manómetros e volumímetros de diferentes escalas, onde o seu erro de leitura associado corresponde a metade da menor divisão da escala do equipamento em causa, assumindo desta forma que o operador consegue realizar um correcto arredondamento.

Ainda nos manómetros, existem duas escalas diferentes: uma para pressões elevadas e outra para pressões baixas. O manómetro de menor grandeza tem como menor divisão da sua escala 0,25 bar, supondo-se o erro de leitura como metade desse valor ($\pm 0.125\text{bar}$). O manómetro de pressão de maior grandeza, utilizado para elevadas pressões apresenta como menor divisão da sua escala 0,5bar e a leitura poderá ser feita com um erro associado de $\pm 0.25\text{bar}$. (Figura 41)

No caso do aparelho de medição de volume, a sua menor divisão da escala é 5cm^3 pelo que, segundo o mesmo critério terá um erro associado à sua leitura de $2,5\text{cm}^3$. (Figura 42)

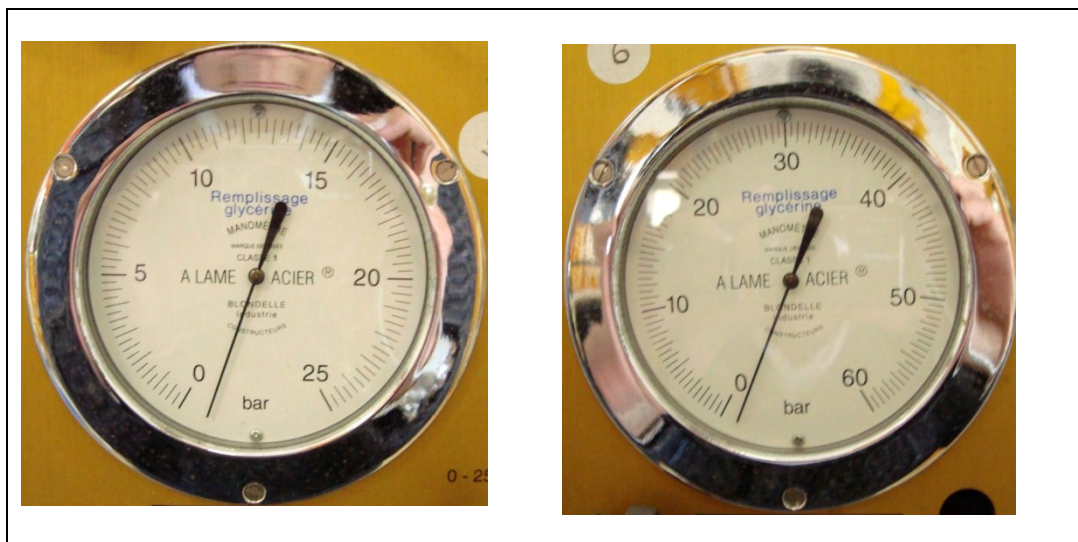


Figura 41 - Manómetros de Pressão do Pressiómetro

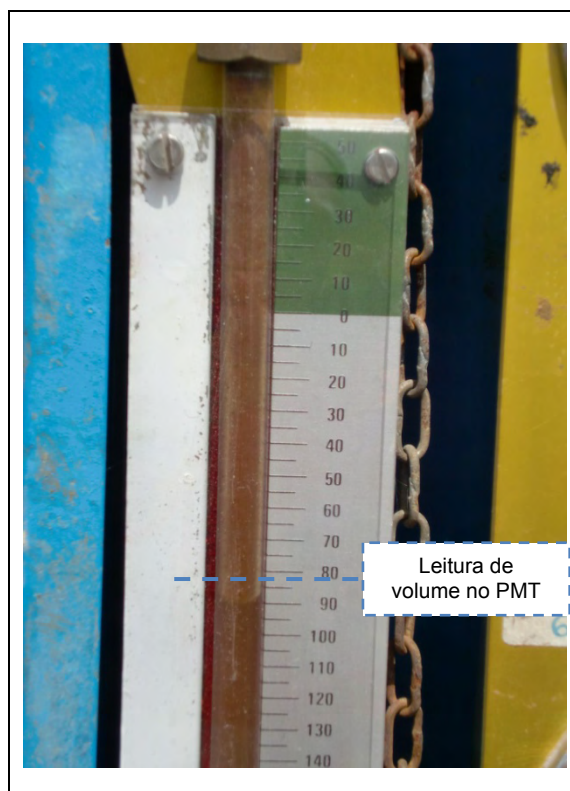


Figura 42 - Escala de leitura de volumes do Pressiómetro

4.4.1.1. Precisão nas medições de profundidade

As medições de profundidade de ensaio, da posição do nível freático e altura de água no aparelho, são efectuadas com uma fita métrica convencional onde a sua precisão será dada pela menor escala que estes equipamentos possuem. Geralmente as fitas métricas convencionais possuem como menor escala o milímetro, a que corresponde a uma precisão de leitura de ± 0.5 mm.

4.4.2. Procedimentos no ensaio

Durante a realização de um ensaio pressiométrico, os operadores durante o procedimento de ensaio podem levar a erros sistemáticos ou aleatórios.

Erros sistemáticos

O erro de paralaxe, devido a posição incorrecta do operador que efectua e regista as leituras (Figura 43). Estes erros são devidos à alteração aparente da posição de um objecto quando observado de diferentes perspectivas. A posição correcta do operador será centrada com o equipamento de medida e ao mesmo nível de leitura.



Figura 43 - Posição do operador em relação ao aparelho.

O equipamento pode não ter sido devidamente calibrado antes da execução de cada ensaio., levando assim a possíveis falhas no registo de leituras pois as mesmas podem não corresponder à realidade do solo.

Erros aleatórios

Por distração o operador pode não efectuar as leituras de volume exactamente aos 30 ou 60s introduzindo uma nova variante de erro.

4.4.3. Processamento das leituras

Durante a realização do ensaio o operador regista todos os valores de pressão e volume obtidos de modo a serem processados com o objectivo de obter os diversos parâmetros geotécnicos possíveis. (Figura 44)

Figura 44 - Registo de campo

Os erros mais frequentes no processamento, são na introdução de valores de leituras na plataforma de cálculo, normalmente devido a introdução incorrecta de valores ou de erros em casas decimais. Quando estes não são detectados introduzem-se os erros de propagação, onde o mesmo é reproduzido por todas as expressões matemáticas onde estiver envolvido.

Neste trabalho apenas são considerados os erros relativos à precisão do equipamento de medida, partindo do pressuposto que os operadores que realizam os ensaios têm o nível de formação necessária para minimizar o possível a ocorrência de erros na execução de um ensaio pressiométrico, assim como no registo das suas leituras.

Capítulo 5.

MODELO ANALÍTICO

5. MODELO ANALÍTICO

A análise de fiabilidade dos parâmetros obtidos em ensaios *in situ*, faz todo o sentido tendo em conta que os seus resultados numéricos são influenciados pelos vários tipos de erros apresentados no capítulo anterior. O efeito que esses erros podem ter nas expressões matemáticas assim como a sua propagação, pode ser estudado através de modelos matemáticos.

5.1. Erro Relativo e Erro Absoluto

Todos os tipos de erro descritos no capítulo anterior podem ser expressos como "erro absoluto" ou como "erro relativo". Neste trabalho serão tratados através de duas áreas fundamentais da Matemática: a análise numérica e a estatística.

Seja X um número com valor exacto e x um valor aproximado de X . A diferença entre o valor exacto e o valor aproximado é o erro de X . Ao módulo deste valor, chama-se de Erro absoluto de ΔX .

Assim, como geralmente não temos acesso ao valor exacto X , a definição de erro absoluto não tem na maior parte dos casos utilidade prática. Temos então que determinar um majorante de Δ . este valor designa-se de $\bar{\Delta}$ e satisfaz a condição: O mínimo do conjunto dos majorantes $\bar{\Delta}$ de Δ , chama-se "erro máximo absoluto" em que x representa X .

Geralmente, mais útil do que o erro máximo absoluto é a relação entre este e a grandeza que está afectada pelo erro.

Ao quociente entre o "erro absoluto" e o módulo do valor exacto, chama-se Erro relativo de X :

$$\delta = \frac{\Delta}{|X|}$$

No entanto, na prática não temos acesso ao erro relativo e temos que usar o majorante deste.

Se Δ muito menor que X então:

$$\delta = \frac{\Delta}{|X|} \leq \frac{\bar{\Delta}}{|x|}$$

A base de análise deste trabalho foi fundamentada através de análise dos erros relativos e absolutos dos diversos parâmetros de cálculo associados ao ensaio PMT.

5.2. Modelação numérica

5.2.1. Problema Fundamental da Teoria de Erros

Os erros e a sua teoria têm sido alvos de estudos complexos, pois é fundamental saber interpretar a noção de números, os tipos de números e as respectivas representações, as operações permitidas e os erros cometidos nas mesmas, assim como quais os efeitos a nível da credibilidade do resultado.

O problema Fundamental da Teoria dos Erros envolve o cálculo de uma função $y = f(x)$ e o erro absoluto máximo cometido no mesmo, sabendo-se o erro absoluto máximo associado à variável x .

Seja x_0 o valor medido de uma dada grandeza x pretende-se determinar o valor de $y = f(x)$. Começamos por substituir x pela sua aproximação, x_0 , e calcular $y_0 = f(x_0)$.

Ao fazer-se esta substituição está a introduzir-se um erro em $y = f(x)$ e o valor desse erro é dado por $\Delta y = |y - y_0|$.

Dedução de Δy

Consideremos o desenvolvimento em série de Taylor de $f(x)$, função contínua e derivável em torno de x_0 .

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \dots$$

Trunca-se esta série após o termo de ordem 1. Pelo teorema do resto da série de Taylor,

$$f(x) = f(x_0) + f'(\xi)(x - x_0), \xi \in [x_0, x]$$

Passa-se $f(x_0)$ para o primeiro membro obtém-se $\Delta y = f(x) - f(x_0)$, dado por:

$$\Delta y = f'(\xi)(x - x_0), \xi \in [x_0, x]$$

Finalmente, aplicando á função módulo em ambos os membros, substitui-se $(x-x_0)$ pelo seu majorante $\overline{\Delta x}$, e considerando pequeno o intervalo $[x_0, x]$ na expressão anterior obtém-se a expressão:

$$\overline{\Delta y} \lesssim |f'(x_0)| \overline{\Delta x}$$

Generalizando a expressão para n variáveis, e considerando $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, obtém-se:

$$\overline{\Delta y} \lesssim \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \cdot \overline{\Delta x}_i$$

5.3. Análise Estatística

A Estatística é uma ciência que se dedica à análise e interpretação de dados. Preocupa-se com os métodos de recolha, organização, resumo, apresentação e interpretação dos dados, assim como tira conclusões sobre as características das fontes donde estes foram retirados, para melhor compreender as situações. Torna possível a avaliação de um conjunto de dados de relativa complexidade num curto espaço de tempo, apenas possuindo um software adequado, computador e o conhecimento dos critérios de aplicabilidade inerentes. É uma colecção de métodos para planear experimentos, obter e organizar dados, resumi-los, analisá-los e deles extrair conclusões.

No decorrer deste trabalho surgiu a questão se o comportamento dos erros associados aos parâmetros em estudo apresentava o mesmo comportamento em todos os tipos de solos estudados. Para estudar essa questão recorreu-se à estatística, que permitiu tratar a vasta nuvem de dados de forma rápida, apresentado soluções gráficas de onde foi possível a análise visual do comportamento do erro relativo para cada tipo de solo.

5.3.1. Shapiro Francia

O teste de Shapiro-Francia, variante do teste de Shapiro Wilk (Shapiro, S.S, 1965), é um teste amplo de função distribuição empírica para a hipótese nula de normalidade, conhecido como um teste de boa performance (Royston, 1993).

Neste trabalho foi considerado este teste de hipóteses de modo a verificar a normalidade da distribuição dos dados para cada parâmetro em causa.

5.3.2. Testes paramétricos

Os testes paramétricos baseiam-se na hipótese de que as médias e o desvio padrão de duas séries são iguais com um determinado nível de significância.

São procedimentos que não são livres do tipo de distribuição, visto que eles dependem da suposição de normalidade, exigem que a forma de distribuição dos dados seja conhecida e que exista homogeneidade de variâncias.

Condições de aplicação:

- Variável tenha distribuição normal, ou simétrica
- Homogeneidade de variâncias

Quando essas pressuposições não se verificam e/ou as amostras forem pequenas, aplica-se um teste não-paramétrico, onde não há as mesmas exigências do teste anterior.

Teste ANOVA

A comparação das médias de populações de onde foram extraídas amostras aleatórias e independentes pode realizar-se através de um método de Análise de Variância (ANOVA). Esta técnica estatística cujo objectivo é testar a igualdade entre três ou mais médias permite testar se a variabilidade dentro dos grupos é maior do que a existente entre os grupos. Como método paramétrico pressupõe a independência e normalidade das observações assim como a igualdade de variâncias entre os grupos. (Reis, 1997)

5.3.3. Testes não paramétricos

Os testes não paramétricos são considerados geralmente como alternativa aos testes paramétricos quando os seus pressupostos de aplicação não se verificam, em especial a normalidade de distribuição. Os testes não-paramétricos não obrigam que a distribuição da variável sob estudo seja conhecida (normal). Para amostras de pequenas e diferentes dimensões e onde as variáveis sob estudo não verificam os pressupostos dos métodos paramétricos, os testes não paramétricos são geralmente uma alternativa válida.

Teste de Kruskal-Wallis

Em estatística, o teste Kruskal-Wallis pode ser considerado o teste não-paramétrico alternativo à ANOVA unidimensional (Kruskal & Wallis, 1952) de forma a testar igualdade de uma população entre grupos. Este tem a vantagem de não usar como pressuposto a igualdade de variâncias nem obrigar que a população tenha uma distribuição normal. É um método robusto que pode ser usado para verificar se as amostras provêm da mesma população ou de populações diferentes.

5.4. Considerações

O nível de significância usado nos testes efectuados (Shapiro-Francia e Kruskal-Wallis) foi o usual (5%). Em particular, no conceito deste trabalho de investigação o teste Kruskal-Wallis foi utilizado de modo a verificar estatisticamente a igualdade de comportamento do erro relativo com o tipo de solo. O teste devolve um valor numérico, *p-value*, que indica se existem diferenças estatisticamente significativas para cada tipo de solo.

Com esse valor e considerando um nível de significância de 5% são admitidas as seguintes situações:

1. Nível de Significância > 5% -Não existem diferenças de comportamento estatisticamente significativas.
2. Nível de Significância < 5% Existem diferenças de comportamento estatisticamente significativas.

A informação obtida pode ser conciliada com os gráficos resultantes para cada parâmetro onde visualmente é possível identificar os tipos de solo em que ocorrem comportamentos distintos.

Capítulo 6.

APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. Enquadramento dos solos ensaiados

O trabalho apresentado teve como base os dados de 91 ensaios pressiométricos, realizados nas campanhas de prospecção dos últimos anos pelo núcleo de Geotecnia da Mota-Engil Engenharia e Construção, SA. Estes abrangeram diversos tipos de solo, possibilitando desta forma a análise de propagação do erro de medição em função do tipo de solo. No decurso do trabalho, foi possível seleccionar os 5 grupos de referência identificados em seguida.

Solos Lodosos

Os solos lodosos considerados no âmbito do presente trabalho, correspondem a solos moles a muito moles de natureza argilosa e orgânica, que constituem as aluviões do Tejo, depositados sobre o complexo vulcânico de Lisboa.

Para identificação dos terrenos ocorrentes, foi consultada a folha 34 - D – Lisboa da Carta Geológica de Portugal (Figura 45), à escala 1:50 000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal e respectiva notícia explicativa.



Figura 45 - Extracto da carta geológica do concelho de Lisboa – Alcântara

Solo Sedimentar Argiloso

Os solos sedimentares argilosos estudados pertencem a zona de Tavira e a sua geologia encontra-se caracterizada na folha 53-B Tavira, dos Serviços Geológicos de Portugal, escala 1:50 000 (Figura 46).

Pela notícia explicativa da região em causa foi possível identificar que os ensaios foram realizados nos depósitos de terraço sobreconsolidados de natureza argilosa, com fragmentos líticos de calcário, calcário pulverento e siliciosos de cor acastanhada e avermelhada pertencentes ao Pliocénico, assentes sobre camadas do Miocénico. (Manuppela,1987)



Figura 46 - Extracto da carta geológica de Tavira.

Solo Sedimentar Argilo-Siltoso

Os solos sedimentares argilo-siltosos considerando localizam-se na zona de Portimão e encontram-se cartografados na Carta Geológica da Região do Algarve, à escala 1/100 000, dos Serviços Geológicos de Portugal, conforme se pode observar no extracto da Figura 47.

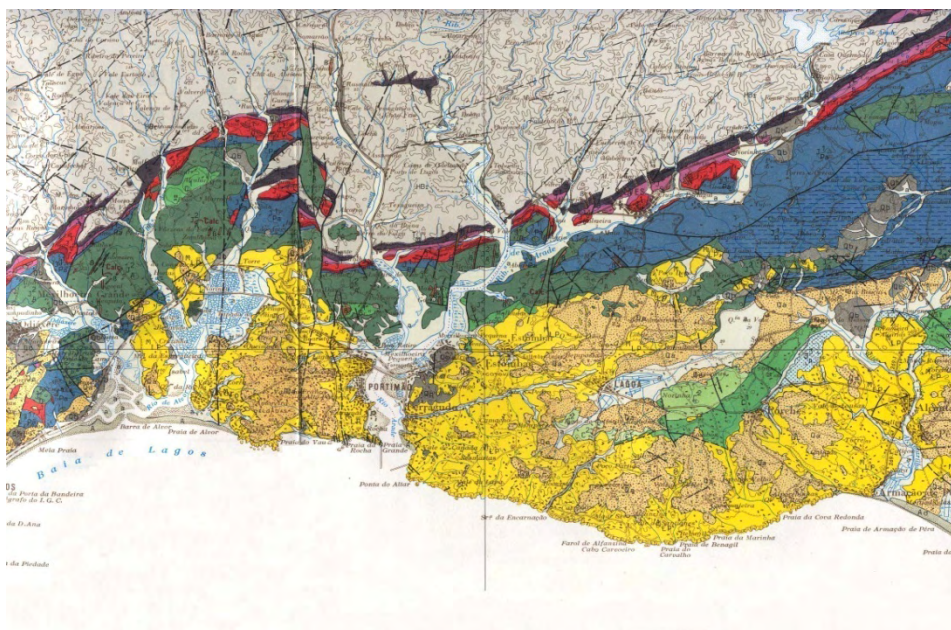


Figura 47 - Extracto da carta geológica de Portimão

Tendo em conta a respectiva notícia explicativa respectiva é possível verificar que o local em estudo se insere na unidade cartográfica do Complexo Vulcano Sedimentar Básico (Rocha et. al, 1983). Os ensaios pressiométricos foram realizados sobre depósitos sobreconsolidados de solos argilo-siltosos vermelhos com núcleos esbranquiçados dispersos.

Solo Sedimentar Arenoso

Os solos sedimentares arenosos ensaiados estão enquadrados na formação de Benfica (Oligocénico) constituída essencialmente por depósitos continentais de natureza arenosa (Choffat et. al, 1912). Para identificação da geologia do tipo de solo em causa, foi consultada a folha 34 - D – Lisboa da Carta Geológica do concelho de Lisboa, à escala 1:10 000 editada pelos Serviços Geológicos de Portugal. (Figura 48) e notícia explicativa respectiva onde a geologia é descrita por Pais et. al. (2006).

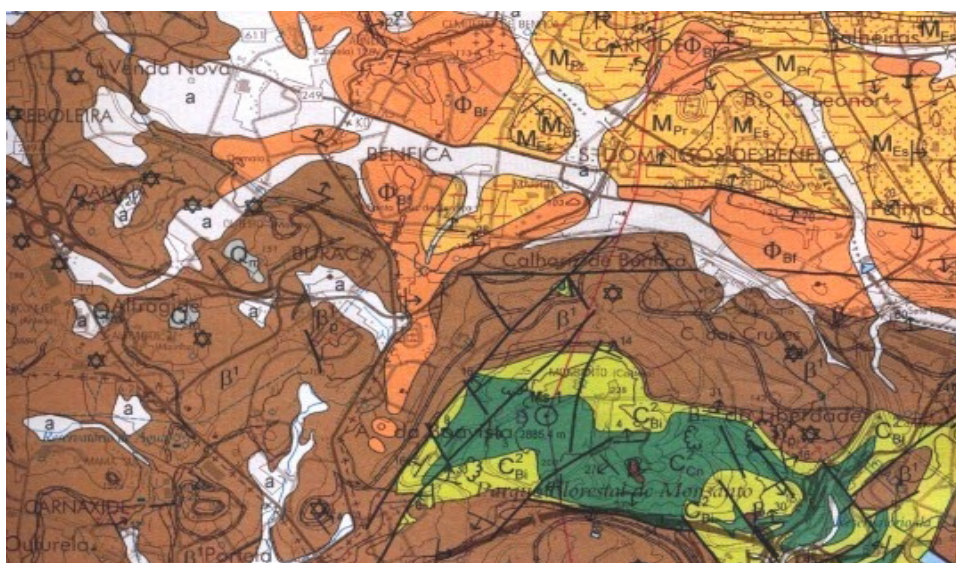


Figura 48 - Extracto da carta geológica de Lisboa – Buraca-Pontinha

Solo Residual Granítico

Os solos deste grupo correspondem a solos de alteração da formação de granito do Porto, constituída por granitos alcalinos, de grão médio a grosseiro, leucocratas de duas micas, conforme a folha 9 - C PORTO da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal (Figura 49). Estes solos resultam da hidrólise dos minerais da família dos feldspatos evidenciado em geral natureza areno-siltosa e compacidade média (Carrington da Costa et. al., 1957). Além disso, o seu comportamento mecânico é claramente influenciado pela existência de uma estrutura de cimentação com reflexos tanto ao nível da resistência como da deformabilidade.

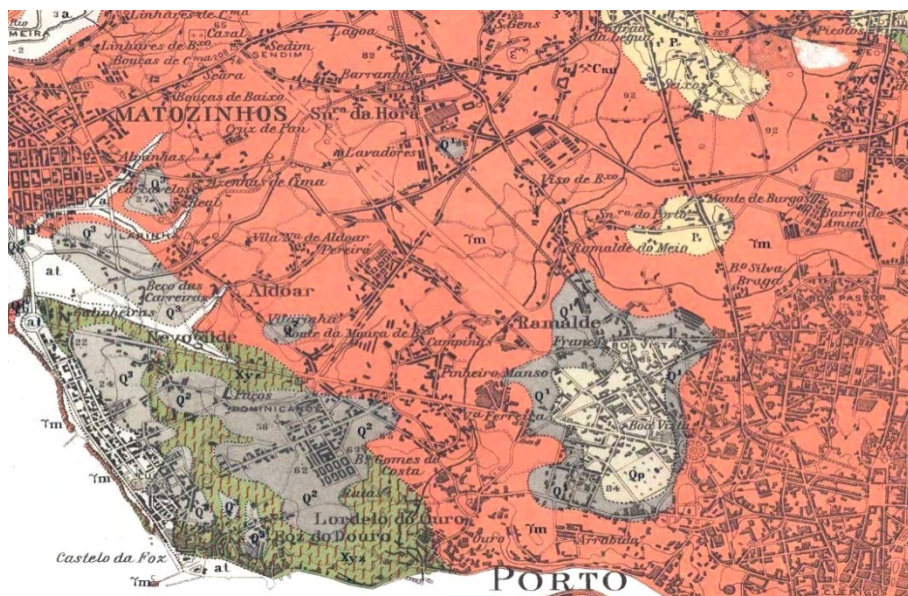


Figura 49 - Extracto da carta geológica do Porto

Considerando a geologia das áreas em questão e os parâmetros de ensaio obtidos, foi possível diferenciar cada grupo de solo enquadrado no estudo (Tabela 15), qualitativa e quantitativamente, em função da geologia e da relação E_{PMT}/P_L , conforme classificações de Ménard (1965) e Clarke (1995).

Tabela 15 - Relação E_{PMT}/P_L dos valores obtidos e sua classificação.

Grupo	Tipo de Solos	Localização	Relação EPMT/PL		Classificação segundo Ménard (1965) e Clarke (1995)
			Intervalo	Média	
A	Lodosos	Aluviões do Tejo, Lisboa	2-10	6	Argilas Lodosas /Turfas
B	Argilosos Duros	Pliocénico, Tavira	6-12	9	Argila Média
C	Argilo-Siltosos	Complexo Vulcano-Sedimentar, Portimão	9-15	12	Argila-Siltosa Média
D	Sedimentares Arenosos	Formação de Benfica, Lisboa	4-12	8	Areia Solta a Medianamente Compacta
E	Residuais Graníticos (Arenos-Siltoso)	Granitos do Porto, Grande Porto	5-20	12	Areia Medianamente Compacta

6.2. Distribuição das medições

Na tabela seguinte apresenta-se um resumo das distribuições das leituras considerando os 5 grupos de referência:

Tabela 16 - Distribuição das leituras consideradas

Tipo de Solo	Designação	Ensaio		Leituras			
		Σ grupo	Total	Pressão	Total	Volume	Total
Solos Lodosos	A	8	91	123	1401	246	2802
Sedimentar Argiloso	B	6		72		144	
Sedimentar Argilo-Siltoso	C	8		117		234	
Sedimentar Arenoso	D	27		404		808	
Residual Granítico	E	42		685		1370	

Visando obter as aproximações do majorante do erro foi efectuada uma análise inicial com o objectivo de determinar a precisão das leituras de campo com base na precisão de referência para cada sistema de medição utilizado num ensaio PMT (manómetros e volumínimetros).

Para cada leitura foram calculados as aproximações dos erros absolutos e relativos associados a cada um dos parâmetros de ensaio e geotécnicos apresentados anteriormente no Capítulo 3.

De seguida apresenta-se para cada grupo de referência o resultado deste cálculo efectuado recorrendo a programação em Matlab[®] usando a *symbolic toolbox* para o cálculo das derivadas parciais.

6.2.1. Solos Lodosos

Os solos lodosos são compostos por minerais e partículas provenientes de matéria orgânica em suspensão no meio aquoso. Normalmente são constituídos por sedimento próprio de terras inundadas como os fundos de mares, rios e lagos. São solos com baixa capacidade de suporte devido à quantidade de água subterrânea neles contida, e são constituídos por partículas muito finas. Na Tabela 17 apresenta-se o resumo das distribuições das leituras efectuadas neste tipo de solos.

Tabela 17 - Distribuição das Leituras Grupo A- Solos Lodosos

Tipo de Solo	Designação	Leituras			
		Pressão	Total	Volume	Total
Solos Lodosos	A1	13	123	26	246
	A2	13		26	
	A3	14		28	
	A4	14		28	
	A5	15		30	
	A6	12		24	
	A7	13		26	
	A8	29		58	

6.2.2. Solos Sedimentares Argilosos

Os solos sedimentares argilosos resultam dos processos de meteorização e transporte com deposição de partículas, são caracterizados pelo seu comportamento não drenado devido à sua baixa permeabilidade e elevada capacidade de retenção de água. A dimensão das suas partículas é inferior a 0,002mm de diâmetro. Na Tabela 18 descreve-se a distribuição das leituras efectuadas no ensaio neste tipo de solos.

Tabela 18 - Distribuição das Leituras Grupo B- Sedimentar Argiloso

Tipo de Solo	Designação	Leituras			
		Pressão	Total	Volume	Total
Sedimentar Argiloso	B1	8	72	16	144
	B2	16		32	
	B3	13		26	
	B4	9		18	
	B5	12		24	
	B6	14		28	

6.2.3. Solos Sedimentares Argilo-Siltosos

Os solos sedimentares argilo-siltosos, resultam dos mesmos processos de formação dos solos argilosos, e apenas diferem na percentagem de silte que apresentam. Siltes são partículas finas resultantes de qualquer fragmento de mineral ou rocha com diâmetro entre os 0,004mm e os 0,064mm. À semelhança dos solos anteriores descreve-se na Tabela 19 a distribuição das leituras efectuadas no ensaio neste tipo de solos.

Tabela 19 - Distribuição das Leituras Grupo C- Sedimentar Argilo-Siltoso

Tipo de Solo	Designação	Leituras			
		Pressão	Total	Volume	Total
Sedimentar Argilo-Siltoso	C1	12	117	24	274
	C2	12		24	
	C3	13		26	
	C4	16		32	
	C5	16		32	
	C6	18		36	
	C7	17		34	
	C8	13		26	

6.2.4. Solos Sedimentares Arenosos

Os solos sedimentares arenosos resultam dos mesmos processos de meteorização e transporte que os argilosos, no entanto são constituídos por grãos de tamanho entre 2mm e 0,075mm e possuem teor de areia superior a 70%. São solos permeáveis por isso a sua capacidade de retenção de água é baixa, são caracterizados pelo comportamento de solos drenados. Possuem também argilas e outros compostos em menor percentagem. A Tabela 20 resume a distribuição das leituras efectuadas nos solos arenosos em causa.

Tabela 20 - Distribuição das Leituras Grupo D – Sedimentar Arenoso

Tipo de Solo	Designação	Leituras			
		Pressão	Total	Volume	Total
Sedimentar Arenoso	D1	15	404	30	808
	D2	14		28	
	D3	16		32	
	D4	22		44	
	D5	19		38	
	D6	18		36	
	D7	12		24	
	D8	10		20	
	D9	21		42	
	D10	13		26	
	D11	9		18	
	D12	9		18	
	D13	12		24	
	D14	17		34	
	D15	11		22	
	D16	18		36	
	D17	17		34	
	D18	14		28	
	D19	11		22	
	D20	12		24	
	D21	13		26	
	D22	15		30	
	D23	13		26	
	D24	23		46	
	D25	13		26	
	D26	19		38	
	D27	18		36	

6.2.5. Solos Residuais Graníticos

O processo de alteração de uma rocha conduz à transformação do maciço rochoso num outro de natureza terrosa, o qual é denominado de solo residual (pelo facto de os seus constituintes permanecerem no local de origem). Em geral estes solos classificam-se como areias siltosas a siltes arenosos e apresentam arranjos das partículas que se traduzem em índices de vazios elevados suportados por uma estrutura de cimentação típica de comportamento colapsível.

A Tabela 21 apresenta o resumo das distribuições de leituras efectuadas no PMT em solos residuais.

Tabela 21 - Distribuição das Leituras Grupo E- Solo Residual Granítico

Tipo de Solo	Designação	Leituras			
		Pressão	Total	Volume	Total
Residual Granítico	E1	11	685	22	1370
	E2	14		28	
	E3	14		28	
	E4	16		32	
	E5	14		28	
	E6	12		24	
	E7	17		34	
	E8	13		26	
	E9	9		18	
	E10	14		28	
	E11	14		28	
	E12	16		32	
	E13	13		26	
	E14	14		28	
	E15	16		32	
	E16	16		32	
	E17	18		36	
	E18	13		26	
	E19	15		30	
	E20	25		50	
	E21	14		28	
	E22	10		20	
	E23	13		26	
	E24	16		32	
	E25	15		30	
	E26	35		70	
	E27	26		52	
	E28	19		38	
	E29	21		42	
	E30	17		34	
	E31	18		36	
	E32	34		68	
	E33	23		46	
	E34	19		38	
	E35	14		28	
	E36	12		24	
	E37	15		30	
	E38	18		36	
	E39	11		22	
	E40	9		18	
	E41	14		28	
	E42	18		36	

6.3. Precisões dos parâmetros de entrada

As tabelas seguintes apresentam um resumo do erro absoluto máximo associado a cada grandeza medida e a cada variável considerada.

Tabela 22 - Valores de erro absoluto máximo associados às grandezas medidas

Nome	Variável	Erro absoluto máximo
Pressão	P	$\delta P \leq 0.125$
Volume	V	$\delta V \leq 2.5$

Tabela 23 - Valores de erro absoluto máximo associados às constantes utilizadas

Nome	Variável	Erro absoluto máximo
Peso volúmico da água	γ_w	$\delta \gamma_w \leq 0.005 \text{ kN/m}^3$
Profundidade	z	$\delta z \leq 0.005 \text{ m}$
Nível freático	NF	$\delta NF \leq 0.005 \text{ m}$
Comprimento Sonda	L_0	$\delta L_0 \leq 0.005 \text{ m}$
Raio da Sonda	r_0	$\delta r_0 \leq 0.005 \text{ m}$

6.4. Dados de Saída

No anexo I apresenta-se a programação em MatLab elaborada com o objectivo de obter uma tabela final de armazenamento de dados com todos os valores calculados (valor absoluto estimado, aproximação dos majorantes dos erros relativos e absolutos).

Estes dados foram utilizados de modo a obter gráficos dos diversos parâmetros e do seu erro associado, podendo desta forma visualizar a sua propagação.

De seguida serão apresentados os gráficos resultantes e tabelas resumo com os dados utilizados, de modo a obter conclusões sobre o comportamento do majorante do erro para os vários parâmetros considerados.

6.5. Análise da propagação de erros

6.5.1. Parâmetros Básicos de Ensaio

Na tabela seguinte apresenta-se um resumo dos valores médios do erro relativo e seu intervalo, para os parâmetros básicos do ensaio pressiométrico em função do tipo de solo.

Tabela 24 - Intervalos do erro relativo dos parâmetros básicos do ensaio PMT (%).

	Solos Lodosos		Sedimentar Argiloso		Sedimentar Argilo-Siltoso		Sedimentar Arenoso		Residual	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
P_0	9-37	20	4-32	18	16-42	27	4-63	24	6-183	22
P_F	5-14	8	1-6	4	1-18	4	1-23	4	1-23	3
P_L	0.3-1	0.6	0.2-0.3	0.2	0.1-0.3	0.2	0.2-0.8	0.4	0.1-0.8	0.2
E_{PMT}	24-51	38	13-33	21	8-28	17	3-92	24	8-42	17

A figura que se segue mostra a evolução do erro relativo tendo em conta os valores a tabela resumo apresentada, de forma a visualizar a propagação do erro para os parâmetros do ensaio Ménard.

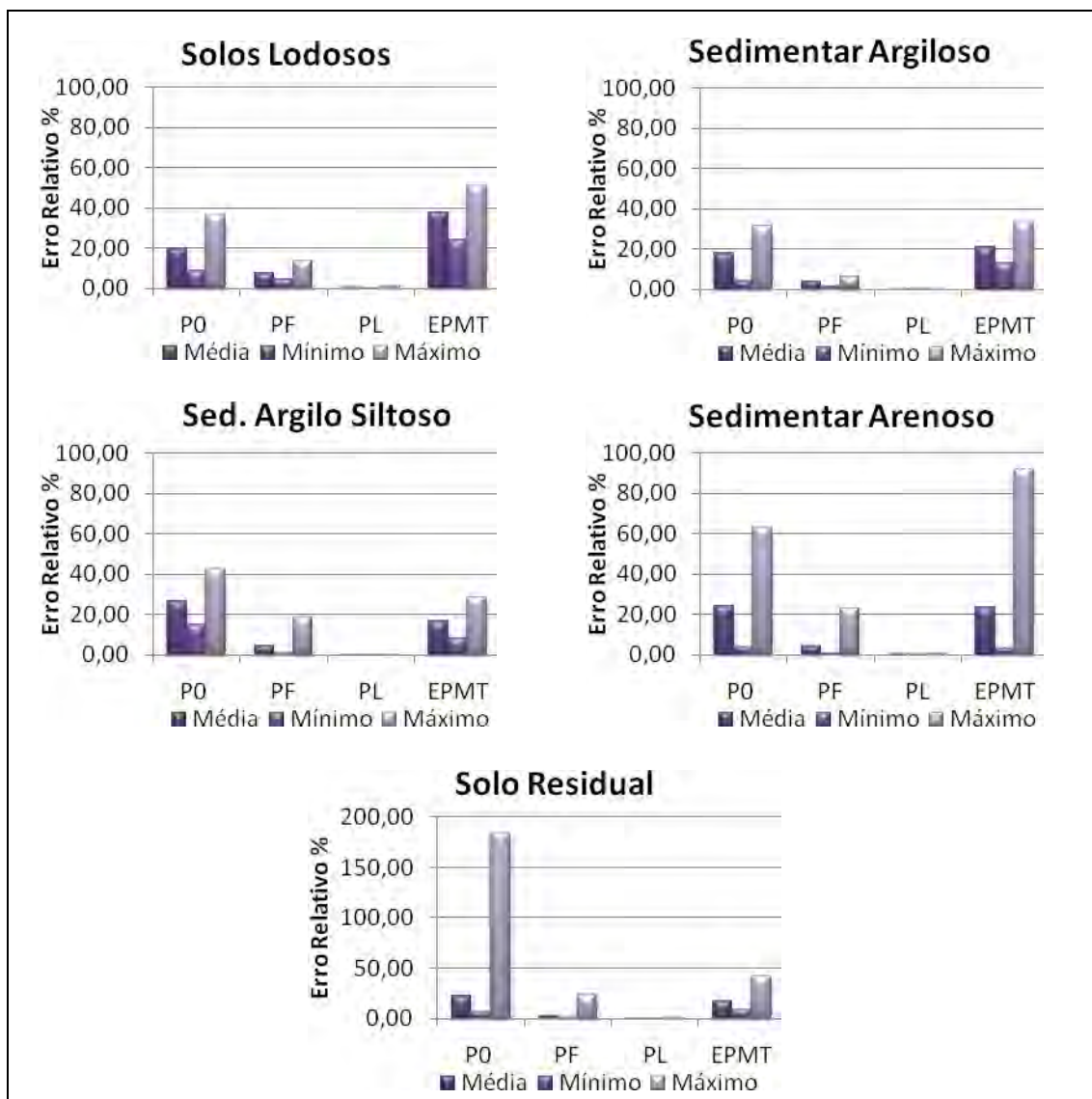


Figura 50 - Evolução do erro relativo em função do tipo de solo (%). Parâmetros de Ensaio.

No caso dos solos residuais, o parâmetro P_0 atinge pontualmente valores máximos de erro relativo superiores a 100%. Tendo em conta os solos arenosos o parâmetro P_0 revela também valores elevados. Esta situação deve-se primeiramente ao facto de certas curvas pressiométricas obtidas terem as primeiras leituras de pressão aos 30 e aos 60s muito próximas, não sendo possível definir uma fase de encosto da sonda às paredes do furo. Esta tendência além de tornar difícil a avaliação do parâmetro P_0 , resulta em erros elevados no mesmo, que por sua vez influenciam significativamente o parâmetro E_{PMT} .

Após análise das derivadas parciais do parâmetro P_0 conclui-se que o erro relativo a ele associado depende fortemente da profundidade de realização do ensaio, sendo que para pequenas profundidades o erro aumenta consideravelmente, explicando também os erros relativos com valores elevados (Tabela 25).

Tabela 25 - Exemplo da evolução do erro relativo com a profundidade no P_0

z (m)	P_0 (bar)	Erro Relativo (%)
2	0,5	184
4	0,5	35
6	0,5	24
9	0,5	19

Da análise dos gráficos apresentados é importante salientar os erros resultantes na avaliação do módulo pressiométrico. Como esperado o majorante do erro relativo em solos lodosos é elevado, onde para o caso do E_{PMT} rondam os 40%, de seguida estão os solos arenosos com erros por volta dos 24% explicados anteriormente pelo comportamento de P_0 . No caso dos solos argilosos, argilo-siltosos e residuais o erro encontra-se próximo de 20%.

6.5.2. Parâmetros Geotécnicos

Na tabela seguinte apresenta-se um resumo associado dos erros associados à determinação dos vários parâmetros geotécnicos.

Tabela 26 - Intervalos do erro relativo dos parâmetros geotécnicos do ensaio PMT (%).

	Solos Lodosos		Sedimentar Argiloso		Sedimentar Argilo-Siltoso		Sedimentar Arenoso		Residual	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
Cu Pico	12-23	18	12-17	16	7-41	17	--	--	--	--
Cu Resid	3-5	4	2-5	3	2-8	4	--	--	--	--
ϕ	--	--	--	--	--	--	6-37	12	7-23	13
ψ	--	--	--	--	--	--	8-49	26	6-46	21
G_a	24-51	38	13-33	21	8-28	17	3-92	24	8-42	17
G_g	9-25	14	5-24	13	8-28	16	3-50	12	2-41	9
E	24-51	38	13-33	20	8-28	17	3-92	24	8-42	17

Tal como foi apresentado para os parâmetros de ensaio, apresenta-se de seguida graficamente para os parâmetros geotécnicos a evolução do erro relativo considerando os valores da tabela resumo apresentada.

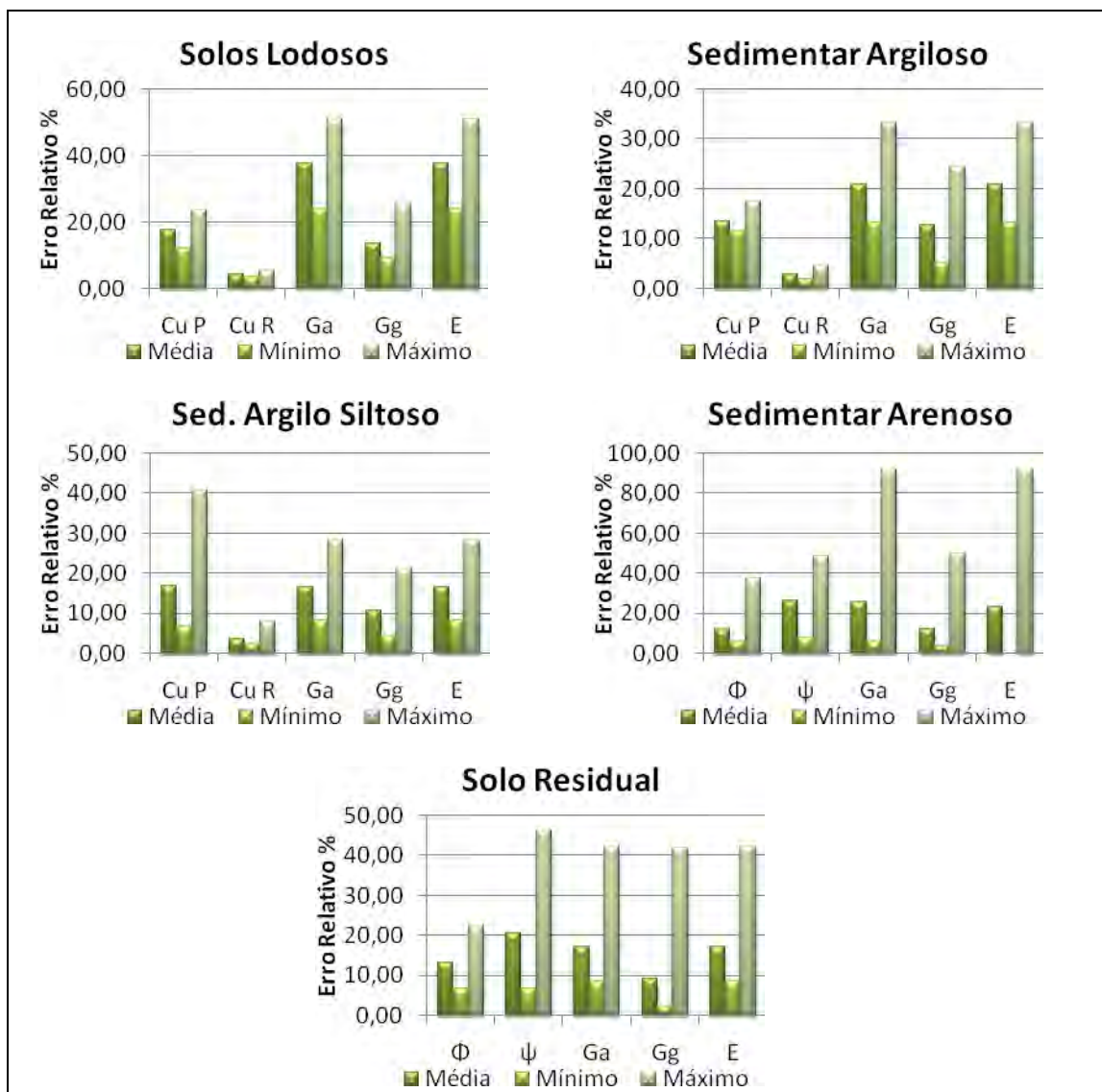


Figura 51 - Evolução do erro relativo em função do tipo de solo. Parâmetros Geotécnicos.

A determinação dos parâmetros geotécnicos é feita tendo em conta os parâmetros de ensaio atrás apresentados. Desta forma é fácil perceber que os erros expressos se irão propagar no cálculo dos parâmetros geotécnicos. Esta situação é facilmente visível para o caso do módulo de distorção G e o módulo de Young E que resultam de correlações com o módulo de Ménard. Graficamente verifica-se que os erros associados a estes parâmetros são iguais aos do E_{PMT} .

Para os tipos de solo em causa verifica-se que o majorante do erro associado à coesão não drenada de pico é maior (cerca de 20%) do que para a coesão não drenada residual (cerca de 4%). Assim como no caso dos ângulos de atrito e dilatância onde os erros são maiores no cálculo da dilatância (cerca de 25%). Por vezes atingem-se pontualmente valores máximos elevados para o caso dos solos lodosos e

arenosos, mas de forma geral os erros médios resultantes nos parâmetros geotécnicos não variam significativamente com o tipo de solo.

6.6. Estudo da influência das leituras de pressão e volume no Módulo de Ménard

De modo a verificar que leitura (pressão ou volume) influencia de forma mais significativa o cálculo do módulo pressiométrico E_{PMT} , foram calculadas as derivadas parciais dos parâmetros presentes na sua fórmula de cálculo de modo a visualizar qual seria o mais influente. Os valores médios destes resultados estão apresentados na tabela seguinte e resultam da análise de todos os ensaios de base deste trabalho, para cada tipo de solo.

Tabela 27 - Resultados das derivadas parciais associados a cada parâmetro da fórmula matemática para o cálculo do E_{PMT} .

Tipo Solo	C.Poisson(%)	V _m (%)	P _F (%)	P ₀ (%)	V _F (%)	V ₀ (%)
S.Lodosos	1	8	34	34	11	11
Argiloso	2	15	21	21	20	20
Argilo siltoso	3	20	12	12	26	26
Arenoso	2	16	19	18	22	22
Residual	3	19	14	14	25	25

Para o caso de solos lodosos verifica-se que a parcela que mais afecta o erro do E_{PMT} é a pressão, no entanto para o caso dos solos residuais e argilo-siltosos é o volume quem mais influencia o erro resultante. Já no caso dos solos argilosos e arenosos, a influência é semelhante em termos de pressão e volume. Na prática, verifica-se que a influência da pressão decresce com o aumento da resistência dos solos, acontecendo o contrário relativamente à influência das leituras de volume. Este estudo será coadjuvado pelos resultados obtidos na secção 6.8.1.4.

6.7. Análise Estatística

No âmbito deste trabalho de investigação, recorreu-se à análise estatística pois surgiu a necessidade de perceber de que modo a aproximação do erro relativo dos parâmetros varia em função do tipo de solo.

A escolha do método a utilizar (ANOVA ou Kruskal-Wallis) implica vários pressupostos, entre eles a normalidade. A normalidade da distribuição foi testada através do teste de Shapiro-Francia .

Os resultados do teste para os parâmetros abordados, indicam que na sua maioria os parâmetros apresentam distribuição não normal, inviabilizando desta forma a aplicabilidade do teste ANOVA. Este conceito pode ser visualmente interpretado pela análise dos “boxplot” da Figura 53, onde revela maioritariamente a distribuição assimétrica dos parâmetros.

Dessa forma, o método de análise considerado foi o de Kruskal-Wallis que não necessita de pressupostos tão fortes para ser realizado. A Figura 52 ilustra a percentagem de dados considerados na análise para cada tipo de solo onde se verifica que o tamanho da amostra é significativamente diferente para cada tipo de solo, tendo em conta que nos solos arenosos e residuais graníticos a nuvem de dados é significativamente maior, a informação retirada a partir deles pode ser mais representativa.

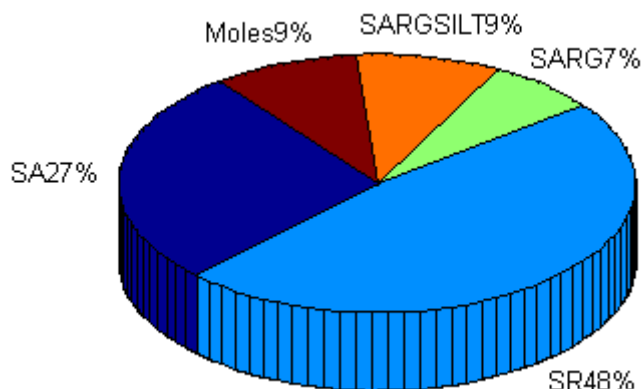


Figura 52 - Distribuição de dados por tipo de solo

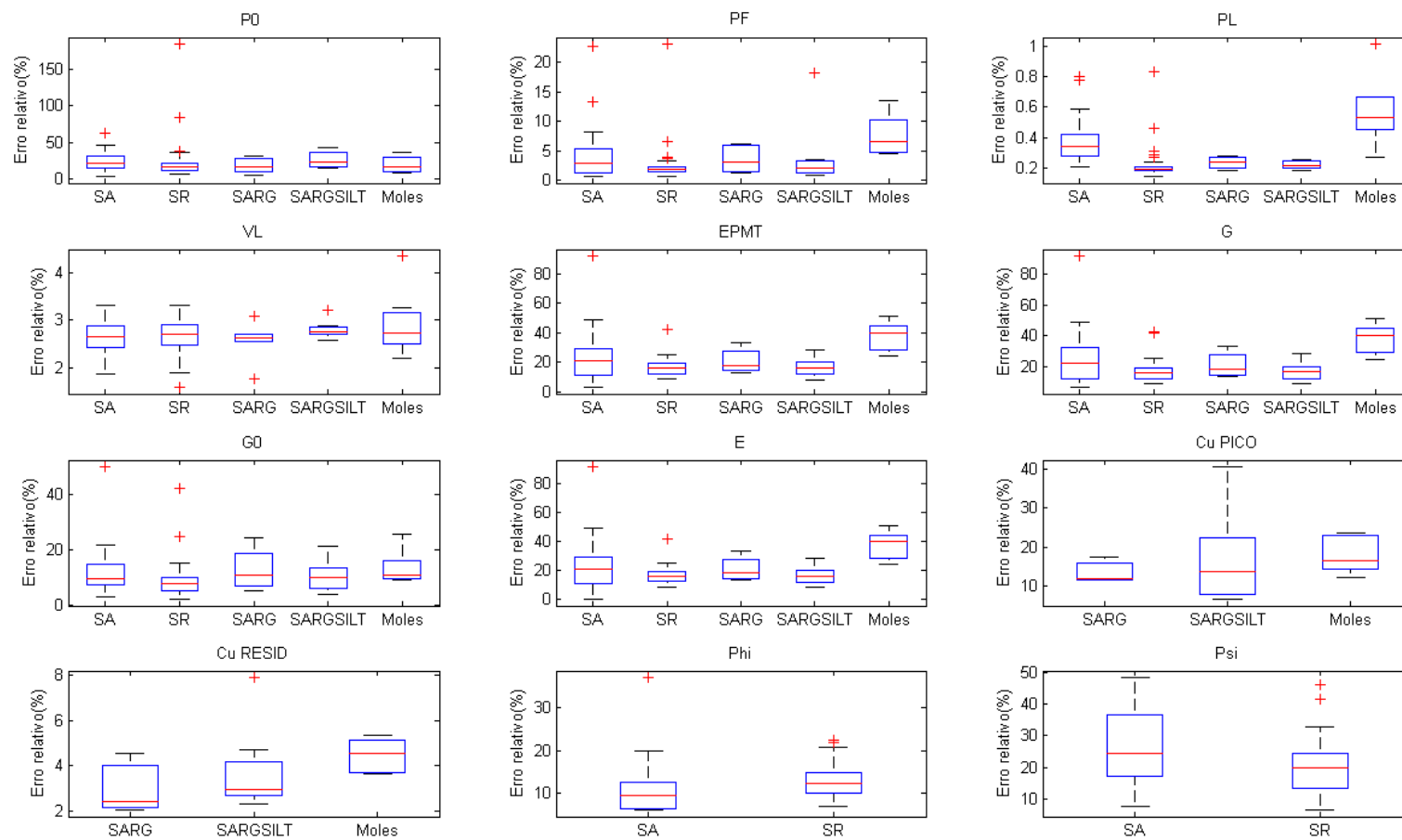
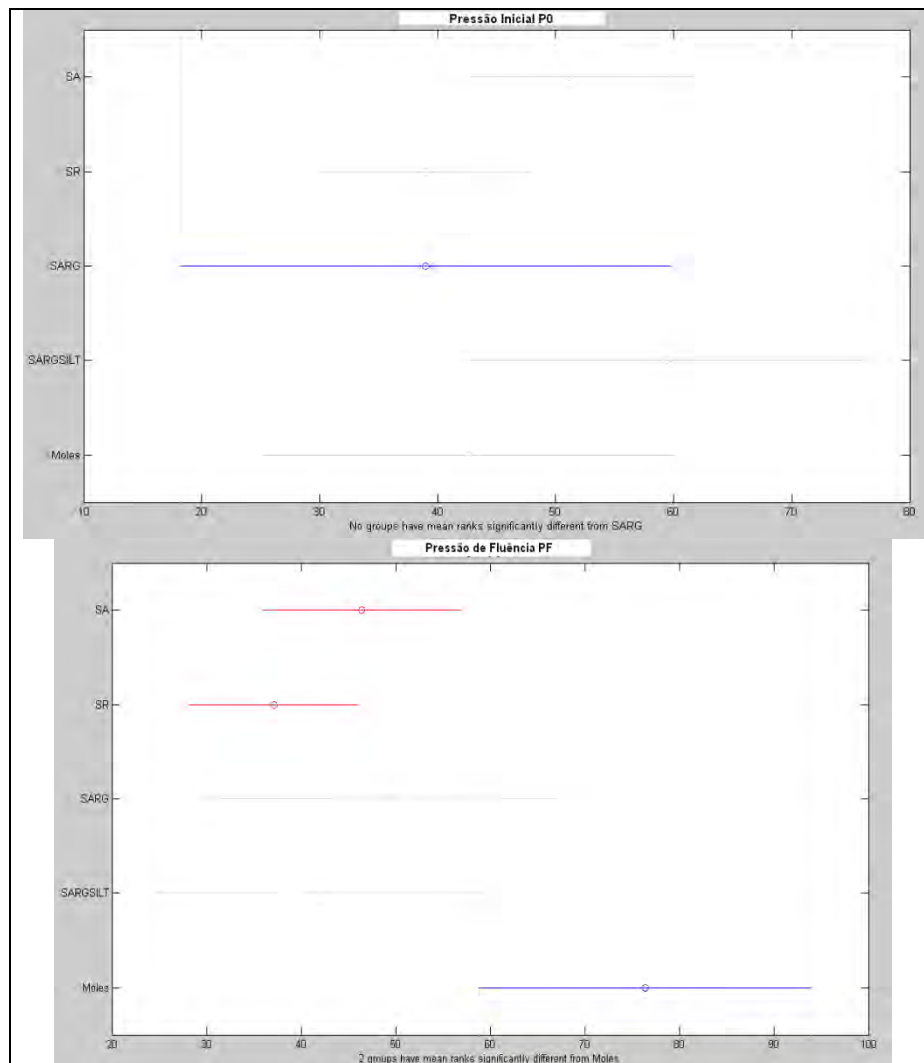


Figura 53 - Avaliação visual do tipo de distribuição e simetria de cada um dos parâmetros através de "boxplot"

6.7.1. Parâmetros de Ensaio

Os parâmetros de ensaio são utilizados de modo a obter os parâmetros geotécnicos, como tal foi verificado o seu comportamento estatístico em função do tipo de solo.

Neste capítulo serão apresentados os resultados do teste de Kruskal-Wallis para um nível de significância de 5%, com os valores do p-value dentro de parêntesis. Para facilidade de leitura, os resultados gráficos da comparação inter-grupo são igualmente evidenciados.



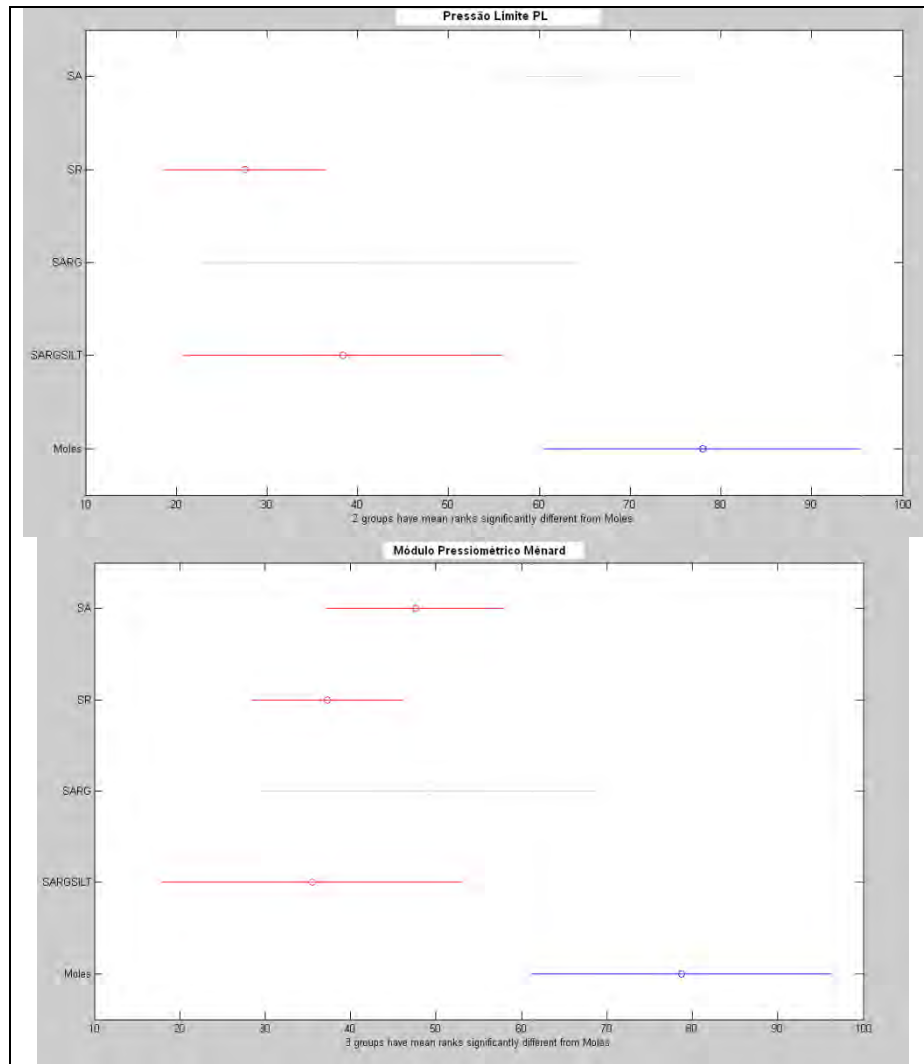


Figura 54 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros de ensaio

Pela análise da Figura 54 (Gráficos P_F , P_L e E_{PMT} , p-values de $2e^{-3}$, $8e^{-6}$, $7e^{-4}$, respectivamente) verifica-se que os solos lodosos apresentam diferenças estatisticamente significativas, em termos de erro relativo médio, em relação aos restantes grupos. Quanto aos solos arenosos, residuais, argilosos e argilo-siltosos, não são detectadas, através deste método, diferenças significativas entre eles, no entanto os solos argilo-siltosos podem por vezes comportar-se da mesma forma do que os solos lodosos.

Em relação ao parâmetro P_0 o teste não revelou diferenças de comportamento do erro relativo estatisticamente significativas nos vários tipos de solo, sendo por isso definido apenas um "cluster".

Tendo em conta a análise da figura anterior, para os parâmetros módulo de Ménard e pressão de fluência, parece razoável admitir a existência de 2 "clusters" que

caracterizam o comportamento estatístico do erro relativo para cada tipo de solo, indicadas na Tabela 28.

Tabela 28 - Interpretação da análise estatística de P_F e E_{PMT} (Figura 54).

Erro Relativo médio	Tipo de Solo	cluster
Menor	Argilo-Siltoso	1
	Argiloso	
	Residual	
	Arenoso	
Maior	Lodoso	2

Continuando na definição de “clusters” a partir da análise da figura anterior, define-se agora para o caso da pressão limite a tabela seguinte.

Tabela 29 - Interpretação da análise estatística de P_L (Figura 54).

Erro Relativo médio	Tipo de Solo	cluster
Menor	Residual	1
	Argiloso	
	Argilo-Siltoso	
	Arenoso	
Maior	Lodoso	2

6.7.2. Parâmetros Geotécnicos

Nas figuras seguintes (Figura 55 a Figura 57) apresentam-se os resultados da análise no contexto dos parâmetros geotécnicos. Na Figura 55 considera-se que a situação do módulo de distorção analítico, G_a , é representativa da situação referente ao módulo de Young, dada a sua relação numérica directa. A análise estatística comprovou numericamente que estes parâmetros são fortemente relacionados, com factores de correlação superiores a 90%, evidenciando assim as suas semelhanças de comportamento.

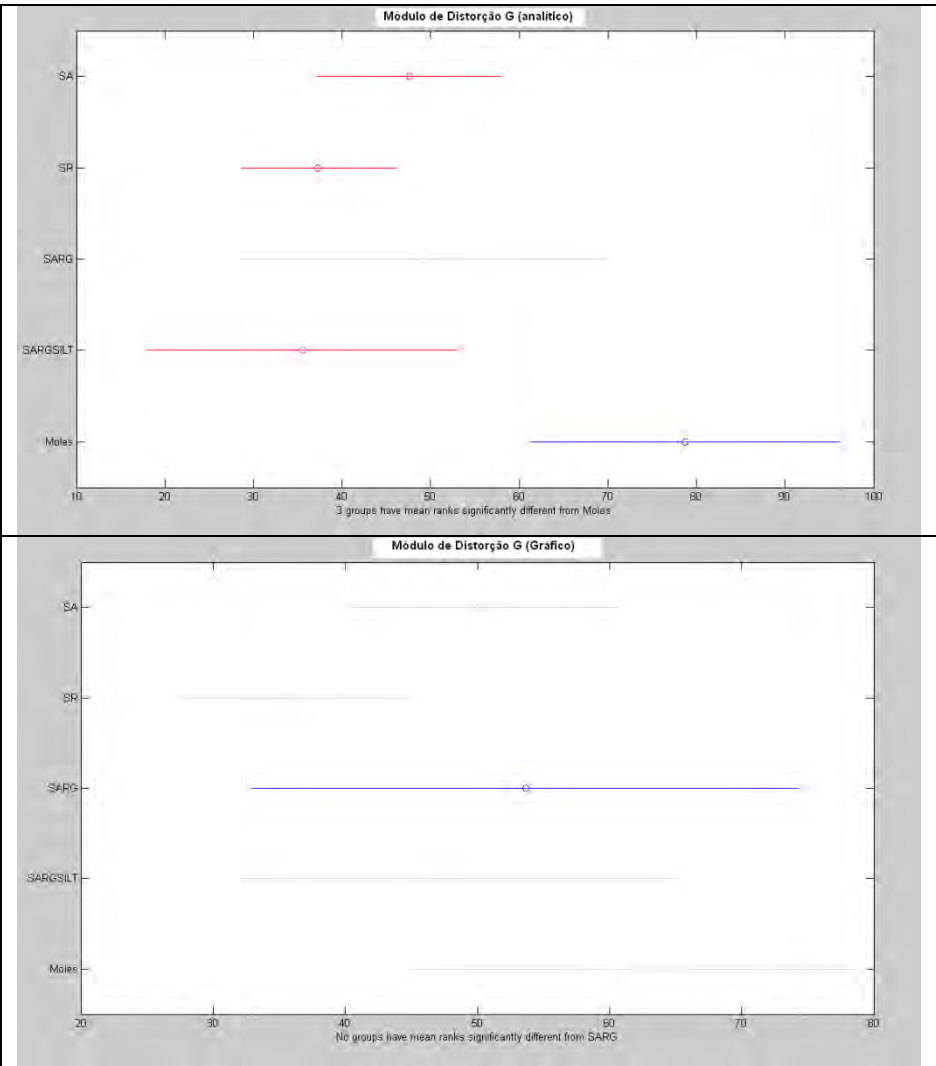


Figura 55 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros geotécnicos G_a , G_g .

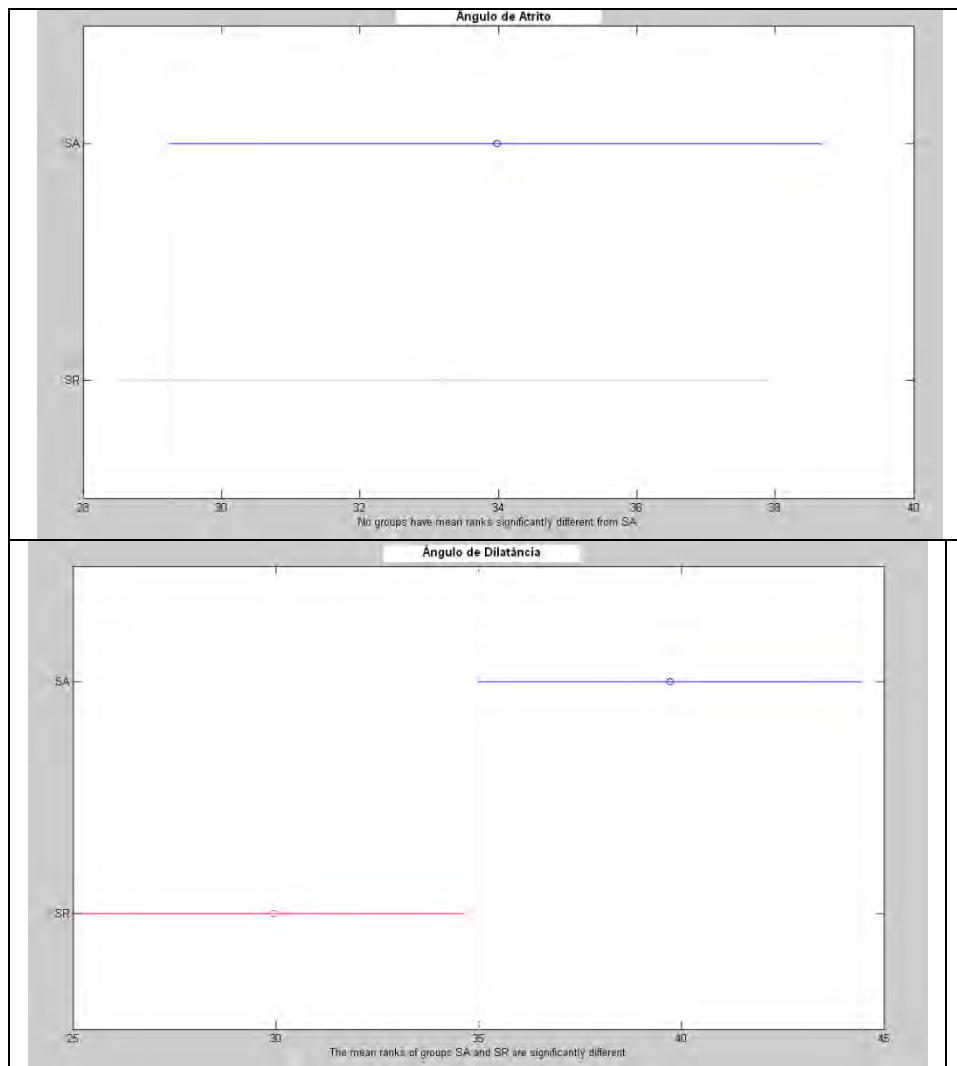


Figura 56 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros geotécnicos Φ e ψ .

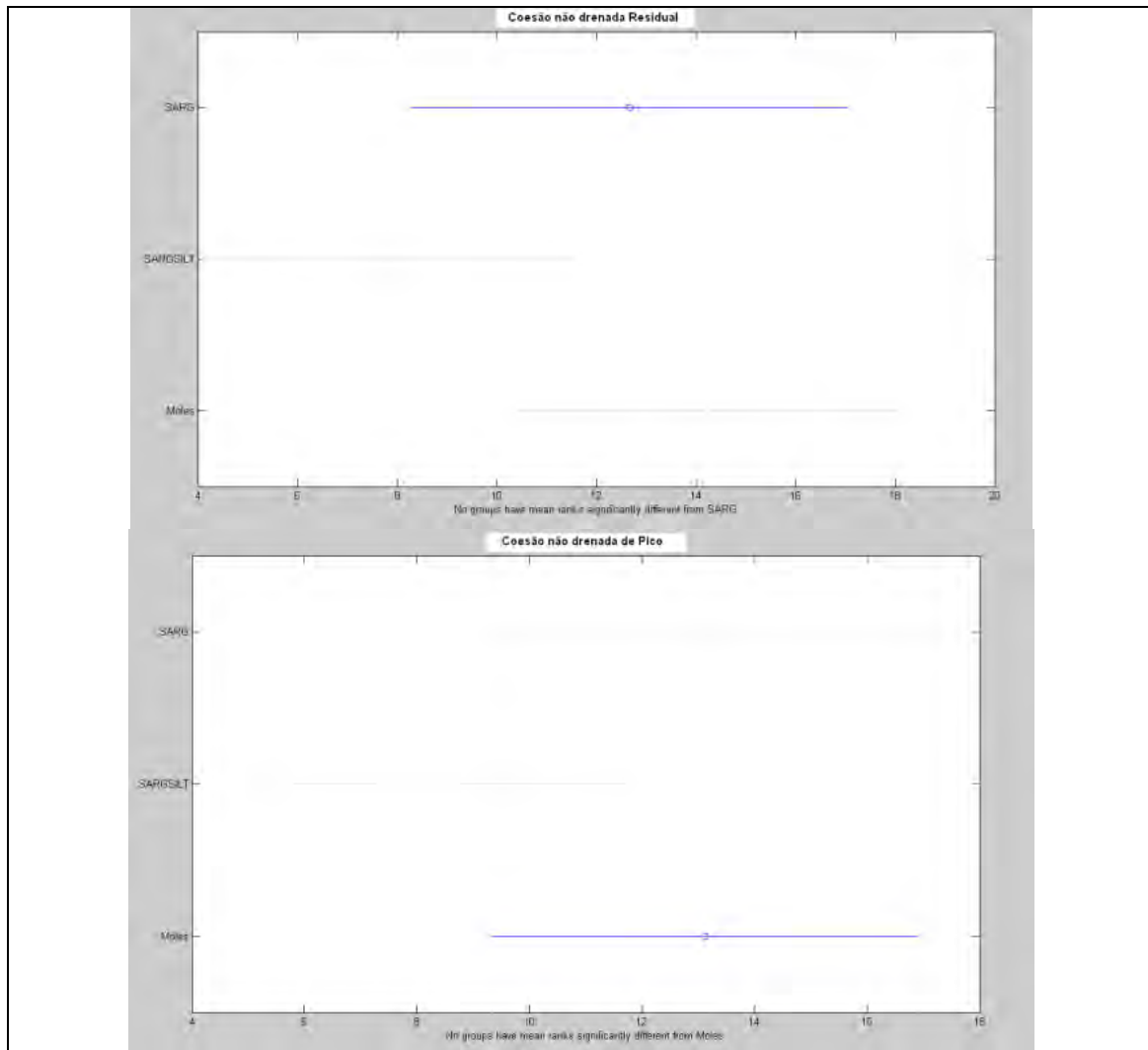


Figura 57 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) de parâmetros geotécnicos CuPico e Cu Resid.

A interpretação destas figuras sugere as seguintes considerações:

- i. No que respeita aos módulos de deformabilidade determinados por via analítica (G_a e E , com p-values $7e^{-4}$ em ambos) a análise estatística revelou diferenças de comportamento em função do tipo de solo. Por sua vez, o módulo de distorção obtido graficamente (p-value $3e^{-1}$), revela comportamento estatístico semelhante em todos os tipos de solo.
- ii. Em relação aos parâmetros de comportamento drenado (ângulos de dilatância e atrito), verificam-se diferenças significativas de comportamento do erro relativo para o caso do ângulo de dilatância (p-value $7e^{-3}$), podendo distinguir-se os solos arenosos dos solos residuais graníticos. No caso do ângulo de atrito esta tendência não se verifica, demonstrando o mesmo comportamento estatístico em todos os tipos de solo.

- iii. No caso dos parâmetros não drenados, coesão não drenada de pico e residual (p-values 1 e 1 respectivamente), estes não apresentam diferenças estatisticamente significativas de comportamento com a variação do tipo de solo, ou pelo menos não são detectadas pelo método de Kruskal-Wallis.

Após esta análise, procurou-se identificar possíveis “clusters” comportamentais cujo resumo é apresentado nas tabelas seguintes.

Tabela 30 - Interpretação da análise estatística do E, G_a e G_g (Figura 55).

	E	G_a		G_g	
Erro Relativo médio	Tipo de Solo		“cluster”	Tipo de Solo	“cluster”
Menor	Argilo-Siltoso	Argilo-Siltoso	1	Residual	1
	Argiloso	Argiloso		Argilo-Siltoso	
	Residual	Residual		Argiloso	
	Arenoso	Arenoso		Arenoso	
Maior	Lodoso	Lodoso	2	Lodoso	

Os parâmetros de deformabilidade (E , G_a) revelam comportamentos distintos pelo que foi possível identificar 2 “clusters”, enquanto o parâmetro G_g envolve todos os tipos de solo num único “cluster”.

Tabela 31 - Interpretação da análise estatística do ψ e Φ (Figura 56).

	ψ		Φ	
Erro Relativo médio	Tipo de Solo	“cluster”	Tipo de Solo	“cluster”
Menor	Residual	1	Arenoso	1
Maior	Arenoso	2	Residual	

O ângulo de dilatação revela estatisticamente que o seu comportamento varia com o tipo de solo, apresentando erros relativos maiores em solos arenosos. Desta forma foi possível identificar 2 “clusters” apresentados na Tabela 31. O mesmo não se verificou no ângulo de atrito onde apenas foi possível identificar um “cluster”

Tabela 32 - Interpretação da análise estatística de CuPico e CuResid (Figura 57).

	CuPico e Cu Resid	
Erro Relativo médio	Tipo de Solo	"cluster"
Menor	Argilo-siltoso	1
	Argiloso	
Maior	Lodosos	

Os parâmetros coesão não drenada de pico e residual, pelo facto de não evidenciarem diferenças de comportamento estatístico em cada tipo de solo, sendo agrupados num único "cluster".

6.8. Evolução do erro relativo médio com diferentes ordens de grandeza de precisão das leituras manométricas e volumétricas.

Após a análise dos erros associados às leituras no ensaio PMT, e sua propagação no cálculo paramétrico, considerando as precisões actualmente utilizadas, procedeu-se à análise da propagação do erro para os mesmos dados supondo diferentes precisões manométricas e volumétricas.

A escolha das precisões a considerar (Tabela 33), teve como objectivo verificar de que forma o erro evolui com o aumento da precisão do equipamento. No caso do pressiómetro o equipamento possui duas unidades de leitura (pressão e volume), pelo que foram estudadas as variações considerando alteração apenas da precisão do manómetro, apenas da precisão do volumínmetro e as duas em simultâneo com o objectivo de verificar qual afectaria de forma mais significativa o resultado final.

De seguida serão apresentados os resultados que se destacaram nesta análise, assim como todos os dados considerados no seu estudo.

Tabela 33 - Precisões consideradas na análise da propagação do erro

Menor Escala (bar)	Erro Leitura (bar)	Menor Escala (cm ³)	Erro Leitura (cm ³)
0,25	0,125	5	2,5
0,1	0,05	5	2,5
0,05	0,025	5	2,5
0,25	0,125	2,5	1,25
0,1	0,05	2,5	1,25
0,05	0,025	2,5	1,25

6.8.1. Parâmetros Básicos

6.8.1.1. Pressão Inicial

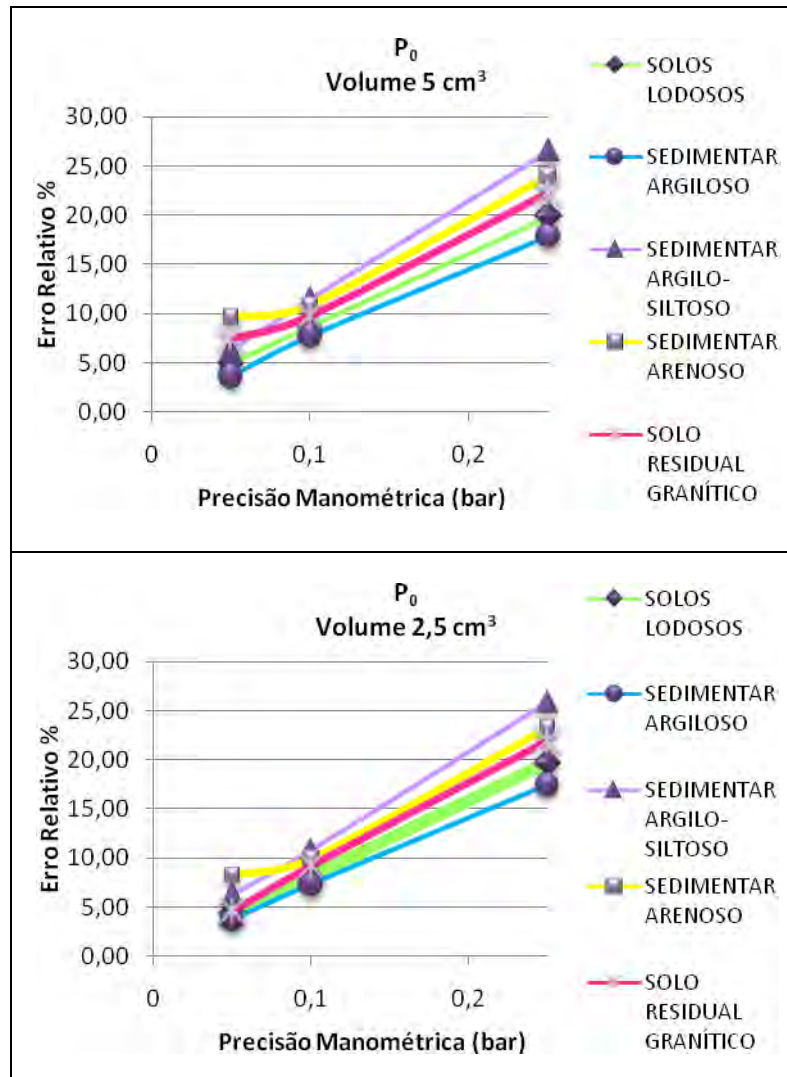


Figura 58 - Gráficos de erro relativo médio da pressão inicial

A análise do gráfico sugere para o P_0 um valor de majorante de erro maior para o caso de solos arenosos e argilo-siltosos do que para solos lodosos. Esta tendência pode não ser representativa tendo em conta a forma das curvas pressiométricas dos ensaios em solos sedimentares referidos (casos particulares), assim como as curvas pressiométricas obtidas em solos lodosos que pela sua elevada deformabilidade a inserção da sonda no terreno pode não avaliar correctamente a pressão inicial. Como foi referido no capítulo 3 (ver Figura 22) a forma da curva pressiométrica pode afectar os resultados. De forma geral e como esperado o majorante do erro relativo diminui com o aumento da precisão manométrica. O aumento da precisão das leituras de volume não trazem melhorias nos resultados para o caso deste parâmetro, pois como a análise do gráfico sugere, não se encontram diferenças significativas.

6.8.1.2. Pressão Fluência

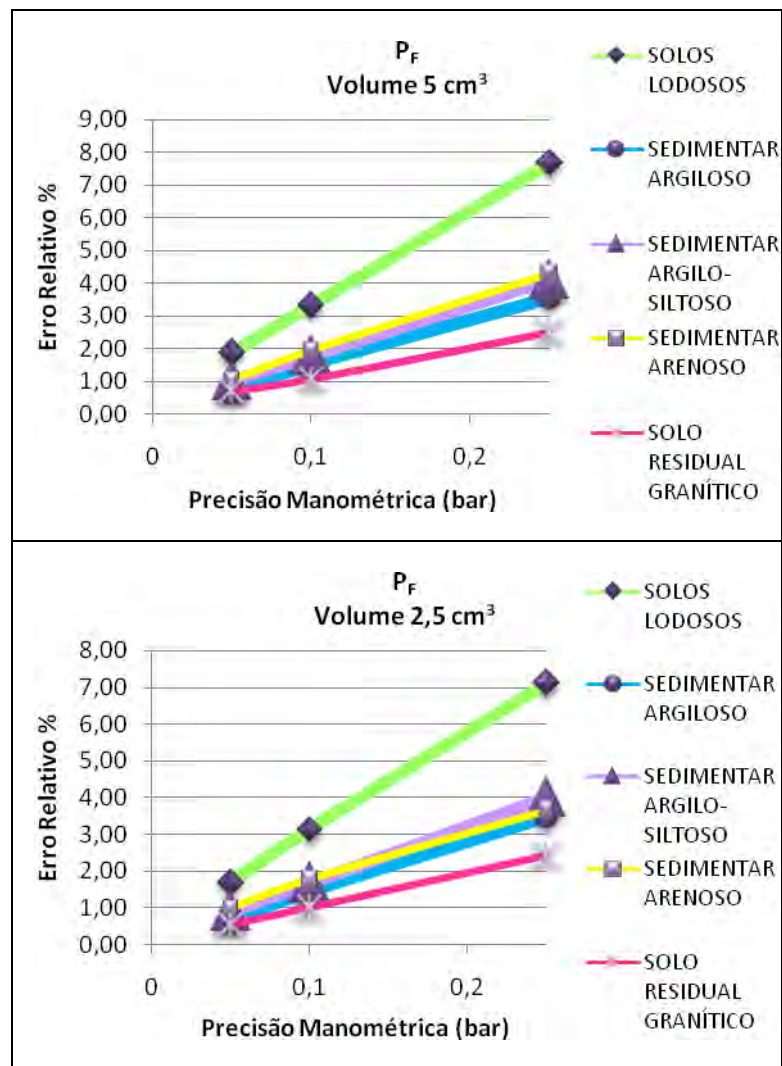


Figura 59 - Gráficos de erro relativo médio da pressão de fluência

Tendo em conta a Figura 59, verifica-se que a pressão de fluência, obtida na fase final da fase elástica, não está sujeita a erros tão elevados (máximo 8% para solos lodosos e 1-4% para os restantes) quanto a pressão inicial, pelo que o aumento da precisão de leituras não é realmente determinante. No entanto mostra de igual forma uma tendência de diminuição de majorante do erro relativo em função do aumento da precisão. O majorante do erro relativo nos solos lodosos, como identificado anteriormente, é bastante superior aos restantes. De forma geral, em todos os tipos de solo o aumento da precisão nas leituras de pressão diminui o erro associado, o mesmo não se verificando com o aumento da precisão nas leituras de volume.

De notar que o aumento da precisão manométrica, reflecte-se numa diminuição gradual do erro relativo verificando-se que os valores tendem a convergir para um

ponto comum, isto é, a taxa de variação é tão mais acentuada quanto mais brando for o solo em questão.

6.8.1.3. Pressão Limite

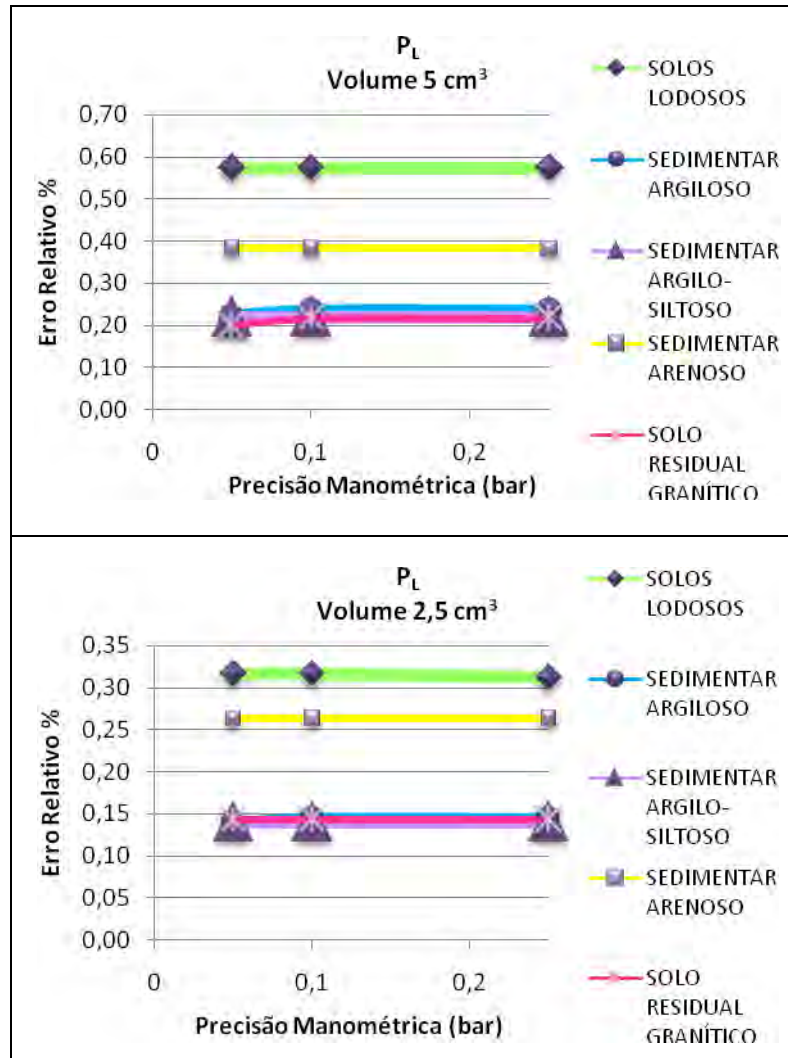


Figura 60 - Gráficos de erro relativo médio da pressão limite

O cálculo da pressão limite é feito por expressões matemáticas de modo a extrapolar o seu valor e não por interpretação directa da curva pressiométrica. Desta forma os erros associados resultam das casas decimais e sua propagação no cálculo, tendo apenas uma parcela do erro associado ao volume limite. Esta tendência verifica-se pela análise dos gráficos (Figura 60) que não revelam grande diminuição do erro com o aumento de precisão dos manómetros, no entanto com o aumento de precisão dos volumínímetros reduz para metade.

6.8.1.4. Módulo Pressiométrico de Ménard

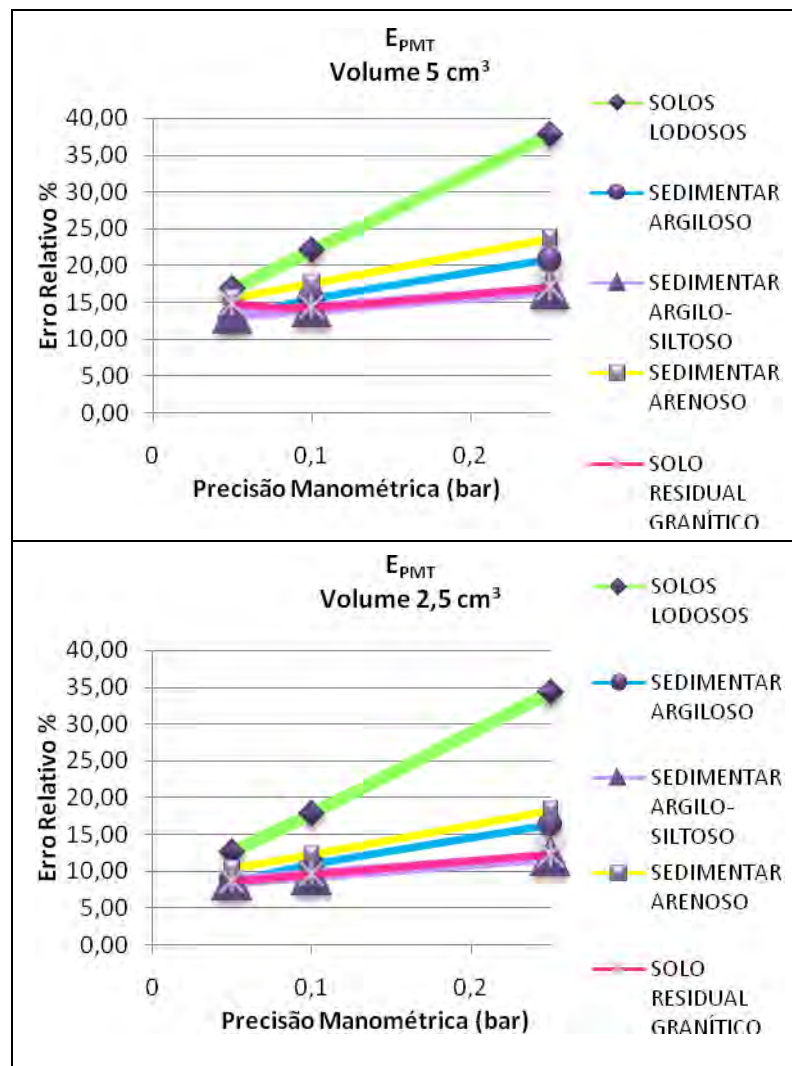


Figura 61 - Gráficos de erro relativo médio do módulo Pressiométrico de Ménard

Um dos parâmetros de maior importância para dimensionamento que se obtém através do PMT é o módulo pressiométrico. A análise dos gráficos acima demonstra erros elevados para todos os tipos de solo bem como a tendência a diminuir com o aumento da precisão de manómetros e volumínimos, com maior incidência no primeiro caso (Figura 61). A mesma figura revela que valores inferiores a 10% só são obtidos para os valores limite de pressão e volume considerados na análise, com excepção dos solos lodosos em que este limite não é atingido. Além disso, verifica-se uma vez mais a tendência para as taxas de variação do erro relativo serem maiores no caso de solos mais brandos.

6.8.2. Parâmetros Geotécnicos

6.8.2.1. Coesão não drenada

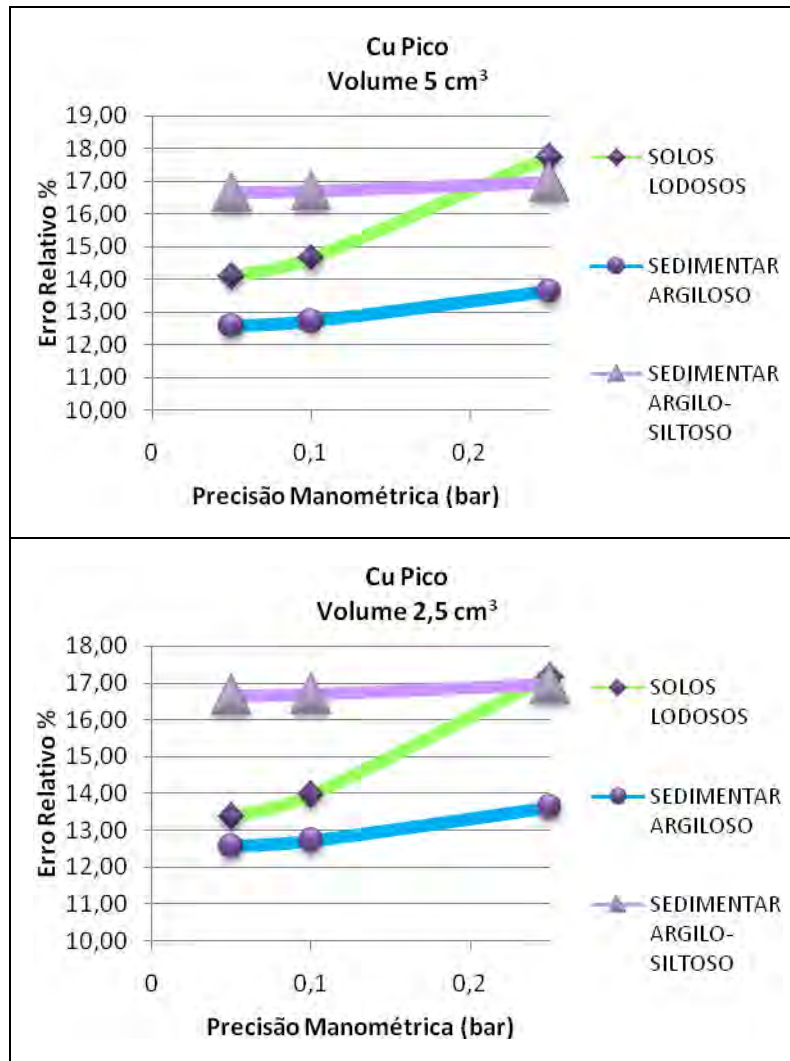


Figura 62 - Gráficos de erro relativo médio da coesão não drenada de pico

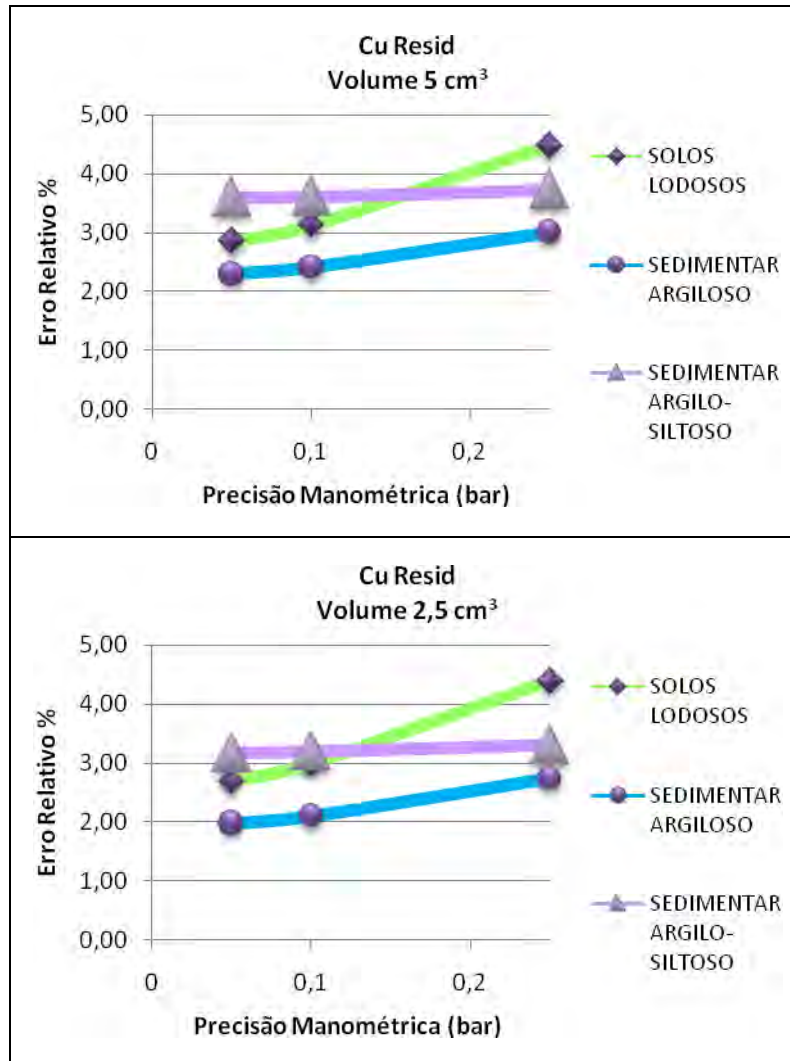


Figura 63 - Gráficos de erro relativo médio da coesão não drenada residual

A dedução dos parâmetros não drenados não parece ser grandemente influenciada pela precisão dos equipamentos, à excepção dos solos lodosos. Esta situação pode ser explicada pelo facto de o cálculo destes parâmetros estar associado ao declive de uma recta de melhor ajuste, o que atenua o impacto directo nos resultados. Por outro lado verifica-se que os erros relativos são superiores no caso da resistência de pico (12-18%), enquanto a resistência residual se mantém sempre inferior a 5%.

6.8.2.2. Ângulo de Atrito e Dilatância

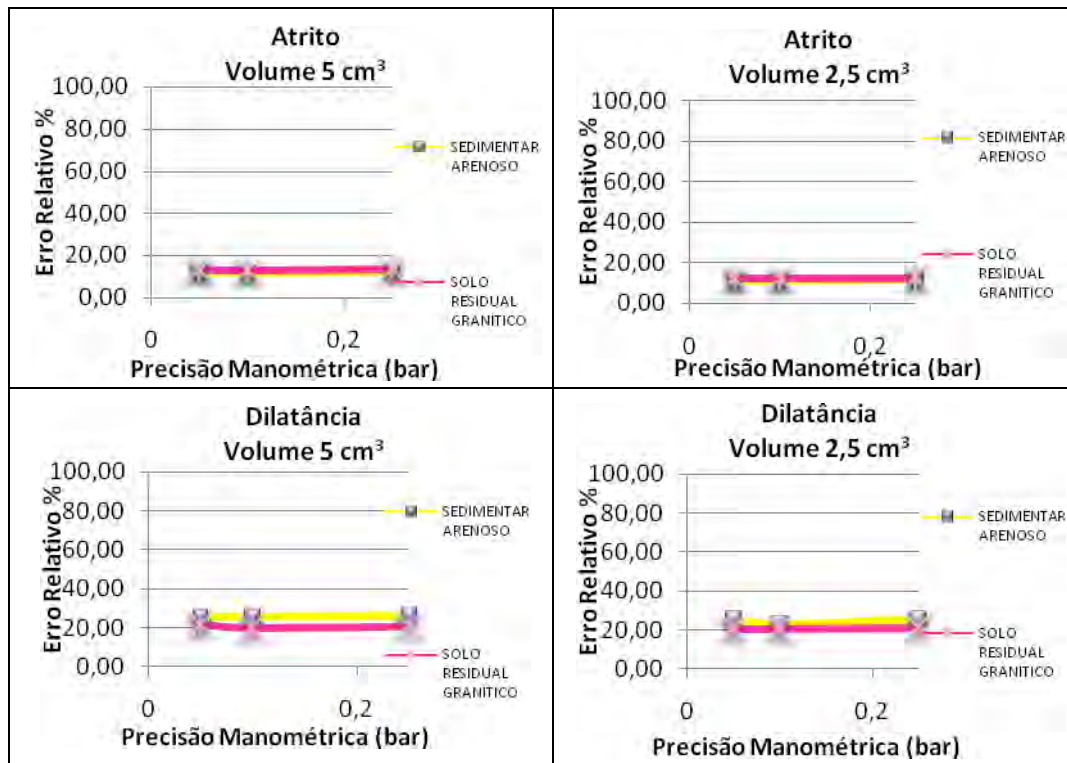


Figura 64 - Gráficos de erro relativo médio do ângulo de atrito e dilatância

Em solos sedimentares arenosos e residuais, a propagação do erro associado aos parâmetros de resistência atrito e dilatância pode ser descrito pelos gráficos da figura e praticamente não varia com o aumento das precisões (por razões análogas ao discutido para os parâmetros não drenados). No entanto ambos os parâmetros revelam majorantes de erro relativo associados elevados, estando os maiores associados ao ângulo de dilatância.

6.8.2.3. Módulo de Distorção módulo de Young

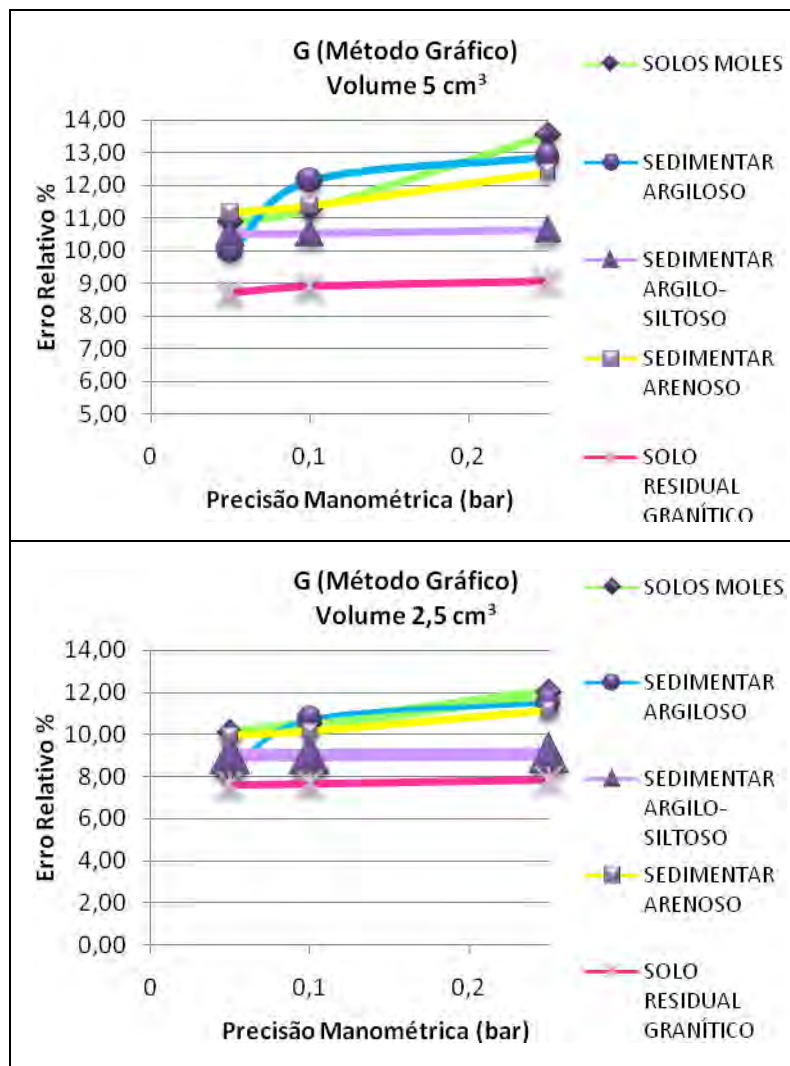


Figura 65 - Gráficos de erro relativo médio do módulo de Distorção

A dedução do módulo de distorção pelo método gráfico evidencia melhores resultados que no caso da determinação analítica. À exceção de solos lodosos, a variação do majorante erro relativo com a precisão dos equipamentos é insignificante. Por seu lado, no caso de E e G_a (Figura 66) verifica-se que a variação do erro relativo, segue a mesma magnitude e taxa de variação verificada para o módulo pressiométrico.

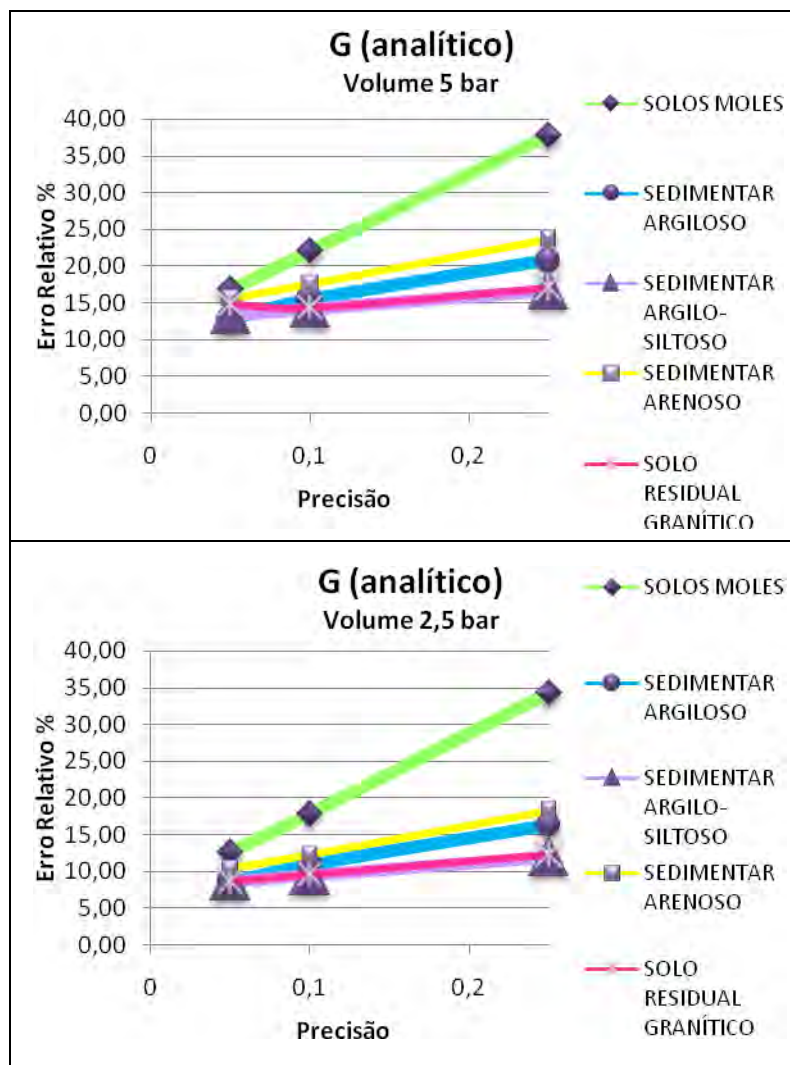


Figura 66 - Gráficos de erro relativo médio do módulo de Distorção Analítico e de Young

6.8.3. Observações

De notar que em alguns ensaios não foi possível obter todos os parâmetros com a qualidade que pretendíamos devido à especificidade do equipamento. Assim, usou-se o seguinte protocolo:

- i. Nos casos em que a curva pressiométrica não atingiu os valores que caracterizam o domínio plástico - solos arenosos com elevada rigidez - não foram estimados os parâmetros de resistência nem a pressão limite.
- ii. Tendo em conta solos lodosos, certas leituras de volume aos 30 e 60s não atingiram um valor devidamente estabilizado, desta forma não foi possível definir um domínio elástico a partir do qual se obtêm os parâmetros de ensaio. Neste caso não foi possível obter qualquer parâmetro do ensaio pressiométrico. Este pressuposto é baseado na elevada deformabilidade deste tipo de solo onde se torna difícil a sua análise através do pressiómetro.
- iii. Os valores elevados do erro relativo no parâmetro P_0 podem não ser representativos, tendo em conta que as primeiras leituras de pressão se revelaram valores muito pequenos, onde o erro associado à escala do equipamento pode estar na mesma ordem de grandeza induzindo em erro a sua análise. O erro relativo depende assim da magnitude da pressão lida, quanto maior a pressão menor será o seu erro relativo.
- iv. Para regressões lineares em que o factor de correlação foi inferior a 95%, o erro relativo resultante do cálculo do parâmetro em causa (o caso do atrito e dilatância ou da coesão não drenada) é muito elevado. Desta forma os parâmetros definidos não foram considerados válidos. No caso da avaliação do erro relativo ao módulo de Distorção G foram considerados os dois métodos de utilização mais comuns, um analítico e o outro gráfico de modo a perceber em qual deles se obtêm maior propagação de erro.
- v. Porque o módulo E_{PMT} é dos parâmetros mais importantes obtidos com o ensaio PMT, efectuou-se um cálculo de derivadas parciais associadas a cada valor medido (P_0, P_F, V_0 e V_F) presente na sua fórmula de cálculo de modo a verificar a influência em termos de erro, de cada um deles.

Capítulo 7.

ANÁLISE PROPAGAÇÃO DE ERROS. COMPARAÇÃO PMT/DMT

7. ANÁLISE PROPAGAÇÃO DE ERROS. COMPARAÇÃO PMT/DMT

7.1. Breve Introdução ao Dilatómetro de Marchetti

Segundo Mateus (2008), o campo de aplicação do Dilatómetro de Marchetti, conhecido também como ensaio DMT, engloba solos granulares ou coesivos, soltos a densos e lodosos a duros respectivamente. Do ponto de vista geológico geotécnico as suas principais aplicações coincidem com as do pressiómetro: determinação de horizontes geológico-geotécnicos, avaliação de parâmetros de deformabilidade e resistência, cálculo da capacidade de carga e avaliação de assentamentos.

O ensaio consiste na cravação de uma lâmina de 20 em 20 cm de profundidade onde em cada intervalo a cravação é interrompida de modo a realizar a expansão da membrana de aço flexível através de gás pressurizado, obtendo desta forma as pressões necessárias para deslocar o seu centro em 0,05mm (leitura A), 1,1 mm (leitura B) e, de novo 0,05 em fase de descarga (Leitura C) (Mateus, 2008).

7.1.1. Parâmetros de ensaio

Partindo das leituras efectuadas durante a execução do ensaio DMT, os dados são tratados tendo em conta a correcção da rigidez da membrana, obtendo-se as pressões corrigidas apresentadas no quadro seguinte.

A partir destas são calculados os vários parâmetros intermédios de ensaio.

Tabela 34 - Parâmetros Básicos de Ensaio DMT (Mateus, 2008)

Símb.	Designação	Expressão numérica
P0	Pressão inicial de expansão	$P0=1.05 \times (A+\Delta A)-0.05 \times (B-\Delta B)$
P1	Pressão final de expansão	$P1=B-\Delta B$
P2	Pressão inicial na descarga	$P2=C-\Delta A$

Tabela 35 - Parâmetros Intermédios DMT (Mateus, 2008)

Símb.	Designação	Expressão numérica
E_D	Módulo dilatométrico	$E_D=34.7 \times (P_1-P_0)$
I_D	Índice de material	$I_D=(P_1-P_0)/(P_0-u_0)$
K_D	Índice de tensão horizontal	$K_D=(P_0-u_0)/\sigma'_v$
U_D	Índice de tensão neutra	$U_D=(P_2-u_0)/(P_0-u_0)$

7.1.2. Parâmetros Geotécnicos

Tendo em conta os parâmetros básicos e intermédios do ensaio, correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos foram desenvolvidos de modo a traduzir o comportamento mecânico de solos. (Mateus, 2008)

Tipo de solo

$I_D > 3.30$ – solos arenosos;

$1.80 < I_D < 3.30$ – solos areno.siltosos;

$1.20 < I_D < 1.80$ – solos silto-arenosos;

$0.90 < I_D < 1.20$ – solos siltosos;

$0.60 < I_D < 0.90$ – solos siltos-argilosos;

$0.35 < I_D < 0.60$ – solos argilo-siltosos;

$0.10 < I_D < 0.35$ – solos argilosos;

$I_D < 0.10$ – argilas sensíveis.

Peso volúmico do solo

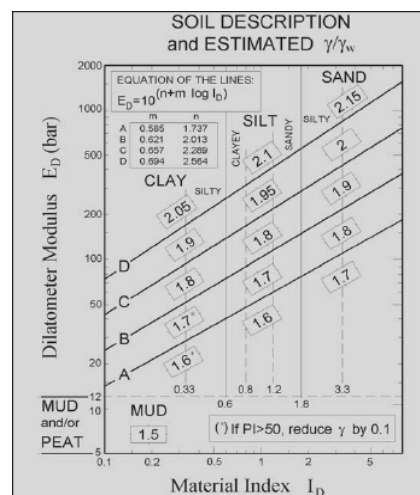


Figura 67 - Diagrama de consulta do peso volúmico (Mateus, 2008).

Estado de tensão “in situ”, k_0

Tabela 36 - Estado de tensão “in situ”, k_0

Se $I_D \leq 1.2$	$(k_D/1.5)^{0.47} - 0.6 < 0.3$
	Sim: $k_0 = 0.3$ Não: $k_0 = (k_D/1.5)^{0.47} - 0.6$
Se $I_D \geq 1.2$	$k_0 = 0.376 + (0.038 \times k_D)$

Grau de sobreconsolidação, OCR

Tabela 37 - Grau de sobreconsolidação, OCR

Se $I_D \leq 1.2$	$OCR = (0.5 \times k_D)^{1.56}$
Se $I_D \geq 1.2$	$OCR = (0.67 \times k_D)^{1.91}$
Se $1.2 < I_D < 2$	$OCR = ((0.5 + 0.1 \times ((I_D - 1.2)/0.8)) \times k_D)^{1.56 + 0.35 \times ((I_D - 1.2)/0.8)}$

Coesão não drenada, c_u

$$\text{Se } I_D \leq 1.2 \rightarrow c_u = 22 \times (\sigma'_v \times (0.5 \times k_D)^{1.25}) / 10$$

Ângulo de resistência ao corte, ϕ'

$$\text{Se } I_D > 0.9 \rightarrow \phi = 28 + 14.6 \times \log_{10}(k_D) - 2.1 \times (\log_{10}(k_D))^2$$

Coesão efectiva e ângulo de resistência ao corte em solos residuais

Tabela 38 - Coesão efectiva e ângulo de resistência ao corte em solos residuais

Símb	Designação	Expressão numérica
c'	Coesão efectiva	$c' = 0.3766 \times OCR + 3.0887$
ϕ'	Ângulo de resistência ao corte	$\phi(c'/\sigma'_v) = \phi - (0.1573 \times (c'/\sigma'_v) + 0.0698)$
ϕ'	Ângulo de resistência ao corte	$\phi(c') = \phi - 0.377 \times c'$

Módulo de deformabilidade, M

Tabela 39 - Módulo de deformabilidade, M

Se $I_D \leq 0.6$	$0.14 + 2.36 \times \log_{10}(k_D) < 0.85$
	Sim: $M = 0.85 \times E_D$ Não: $M = (0.14 + 2.36 \times \log_{10}(k_D)) \times E_D$
Se $I_D > 3$	$0.5 + 2 \times \log_{10}(k_D) < 0.85$
	Sim: $M = 0.85 \times E_D$ Não: $M = (0.5 + 2 \times \log_{10}(k_D)) \times E_D$
Se $0.6 < I_D < 3$	$0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) + 2.5 - 0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) \times \log_{10}(k_D) < 0.85$
	Sim: $M = 0.85 \times E_D$ Não: $M = (0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) + 2.5 - 0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) \times \log_{10}(k_D)) \times E_D$

Módulo de Distorsional, G_0

Tabela 40 - Módulo de Distorsional, G_0

Autor	Expressão numérica
Cruz et al (2006)	$G_0 (C) = (E_D/10) \times 3.9366 \times (I_D^{-0.6117})$
Hryciw (1990)	$G_0 (H) = ((530/\sigma'_v)^{0.25}) \times ((\gamma - 1)/(2.7 - \gamma)) \times (k_0^{0.25}) \times (\sigma'_v)^{0.5} / 10$

7.2. Erro Relativo (%) PMT vs DMT

De seguida serão apresentadas as comparações, para as precisões de referência, entre os parâmetros de ensaio obtidos com pressiómetro de Ménard e com o Dilatómetro de Marchetti, conciliando o estudo do presente trabalho com o estudo anteriormente apresentado por Mateus (2008). Deste modo procurou-se a comparação entre os seguintes pares:

- P_0 (DMT) – P_0 (PMT)
- P_1 (DMT) – P_F (PMT)
- E_D (DMT) – E_{PMT} (PMT)
- M (DMT) – E_{PMT} (PMT)
- $CuPico$ (DMT) – $CuPico$ (PMT)
- Φ (DMT) – Φ (PMT)
- G_{0C} e G_{0H} (DMT) – G_g e G_a (PMT)

7.2.1. Resumo de resultados

Tabela 41 - DMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Básicos (%). (Mateus, 2008)

	S. Residuais		S. Argilosos		S. Arenosos	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
P_0	0 - 11	2	0 - 5	2	1 - 7	3
P_1	0 - 5	1	0 - 4	1	0 - 3	0

Tabela 42 - DMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Geotécnicos (%). (Mateus, 2008)

	S. Residuais		S. Argilosos		S. Arenosos	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
c_u	---	---	0 - 54	18	---	---
ϕ'	0 - 3	1	---	---	0 - 4	1
M	0 - 14	0	0 - 80	21	0 - 15	2
G_{0C}	1 - 36	5	2 - 111	27	1 - 24	4
G_{0H}	0 - 39	6	0 - 67	21	0 - 31	5

Tabela 43 - PMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Básicos (%).

	Solos Iodosos		Sedimentar Argiloso		Sedimentar Argilo-Siltoso		Sedimentar Arenoso		Residual	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
P ₀	9-37	20	4-32	18	16-42	27	4-63	24	6-183	22
P _F	5-14	8	1-6	4	1-18	4	1-23	4	1-23	3
E _{PMT}	24-51	38	13-33	21	8-28	17	3-92	24	8-42	17

Tabela 44 - PMT - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Geotécnicos (%).

	Solos Iodosos		Sedimentar Argiloso		Sedimentar Argilo-Siltoso		Sedimentar Arenoso		Residual	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
Cu Pico	12-23	18	12-17	16	7-41	17	--	--	--	--
φ'	--	--	--	--	--	--	6-37	12	7-23	13
G _a	24-51	38	13-33	21	8-28	17	3-92	24	8-42	17
G _g	9-25	14	5-24	13	8-28	16	3-50	12	2-41	9
E	24-51	38	13-33	20	8-28	17	3-92	24	8-42	17

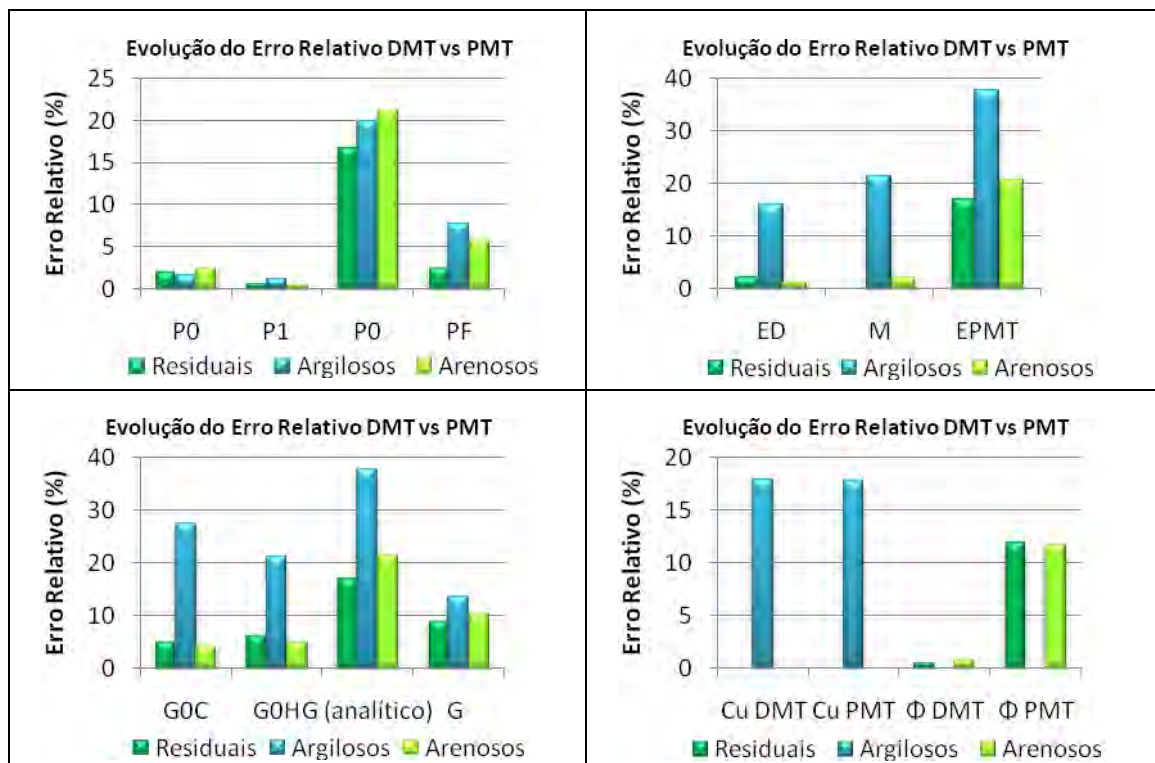


Figura 68 – Comparação Erros Relativos Médios nos parâmetros dos ensaios DMT e PMT.

A análise dos respectivos gráficos (Figura 68) revela que de modo geral todas as comparações fornecem resultados de maior precisão para o caso do ensaio DMT, com exceção dos parâmetros não drenados, cujo erro relativo é idêntico. Na realidade a generalidade dos parâmetros básicos e geotécnicos deduzidos a partir do ensaio DMT

evidencia erros que em geral são inferiores a 10%, com exceção dos solos argilosos. Por seu lado, dos parâmetros básicos e geotécnicos deduzidos a partir do ensaio PMT apenas a pressão de fluência se encontra abaixo desse limite.

.

Capítulo 8.

CONCLUSÕES

8. CONCLUSÕES

Propagação do Majorante do Erro

O objectivo deste estudo assentou na importância de controlar a qualidade dos parâmetros de referência obtidos com os ensaios *in situ* durante campanhas de prospecção geotécnica.

A análise apresentada permitiu destacar os seguintes aspectos:

Para o caso dos solos lodosos, os parâmetros de ensaio P_0 e E_{PMT} traduzem erros máximos superiores a 50%, sendo que as suas médias se situam entre os 17-% e 38% estando muito acima do limite máximo desejável por volta dos 10%. Revelam desta forma impacto significativo no cálculo de parâmetros geotécnicos, como é o caso do módulo de Distorção G_0 e módulo de Young E que são obtidos a partir do módulo pressiométrico e são afectados pelos mesmos erros. Estes erros podem ser minimizados com o aumento da precisão de ambos os aparelhos de medida de pressão e volume.

Por seu lado os parâmetros de ensaio P_F , P_L apresentam majorantes do erro relativo com valores mínimos inferiores a 10%, não revelando desta forma impacto significativo. Estes exibem um comportamento semelhante quando sujeitos a aumento de precisão das leituras de pressão, revelando uma diminuição do erro com o aumento da precisão, mantendo-se constantes com o aumento da precisão das leituras de volume. Os erros mais elevados correspondem sempre aos solos lodosos.

Os parâmetros geotécnicos de resistência drenada Φ , ψ apresentam erros elevados (máximos da ordem dos 40% e médios entre 12-26% para o caso da dilatância), que não podem ser minimizados pelo aumento da precisão dos equipamento, mantendo-se sempre superiores a 10%. No caso da resistência não drenada, verifica-se idêntica tendência com o parâmetro de pico enquanto a resistência residual evidencia majorantes do erro relativo mais ou menos constantes e sempre inferiores a 5%.

Finalmente, a dedução dos parâmetros de deformabilidade por via analítica (E e G_a) seguem em magnitude e taxa de variação os mesmos comportamentos exibidos por E_{PMT} . Por seu lado o método gráfico, de dedução do módulo de distorção, parece fornecer resultados com majorantes do erro de menor expressão.

De um modo geral os erros associados aos parâmetros obtidos no ensaio PMT rondam os 20% para a precisão de referência, sendo que para um aumento da precisão de ambas as leituras de pressão e volume se verifica uma diminuição para valores em geral inferiores a 15%.

Da análise dos dados apresentados, verifica-se que o parâmetro mais importante deste ensaio (E_{PMT}) evidencia um erro elevado com as correspondentes consequências na dedução da deformabilidade dos maciços. Considerando um aumento de precisão de ambas as leituras (pressão e volume), verifica-se que globalmente o erro diminui para valores inferiores a 15% neste parâmetro de ensaio. Desta forma, salienta-se que a precisão actualmente utilizada não é a recomendável dada a elevada percentagem de erro associado a cada parâmetro.

Comportamento do majorante do erro relativo com o tipo de solo

A análise estatística apresentada anteriormente permitiu concluir que existem diferenças estatisticamente significativas de comportamento do erro relativo em função do tipo de solo nos parâmetros apresentados, onde foi possível distinguir dois grupos: solos sedimentares e residuais com comportamentos distintos dos solos lodosos.

Para o caso dos parâmetros P_0 , C_u e Φ através do teste de Kruskal-Wallis não foram identificadas diferenças de comportamento significativas nos diversos tipos de solo.

Concluindo, verifica-se que os valores dos erros relativos associados a cada parâmetro deduzido com o ensaio PMT dependem de forma geral do tipo de solo, onde é possível notar um aumento do erro relativo médio nos solos lodosos em relação aos restantes, sendo possível identificar dois grupos:

1. Solos Sedimentares (Argilosos, Arenosos e Argilo Siltosos) e Solos Residuais
2. Solos Lodosos.

No entanto, é importante referir que a nuvem de dados para o caso de solos lodosos é muito pequena em relação aos restantes, factor que pode influenciar na análise estatística. De qualquer forma, pelos conhecimentos teóricos e pelas conclusões apresentadas em relação aos solos lodosos, é coerente admitir que estes tenham um comportamento distinto de todos os outros, revelando erros relativos elevados e evidenciando a fraca capacidade do ensaio PMT para caracterizar este tipo de solos.

Comparação de resultados PMT/DMT

A comparação das análises efectuadas para os ensaios DMT e PMT, revelou erros relativos médios significativamente inferiores no primeiro caso, reforçando a sua melhor aplicabilidade na caracterização de maciços terrosos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na sequência do estudo feito por Mateus (2008) para determinação dos erros de medição associados ao Dilatómetro de Marchetti, foi desenvolvido o presente trabalho associado ao ensaio com o pressiómetro de Ménard. O estudo visou a avaliação da propagação do erro associado às leituras efectuadas no ensaio e nas expressões de cálculo utilizadas na determinação de parâmetros geotécnicos. O mesmo foi baseado em diversos ensaios executados em vários locais com características geológicas distintas.

Numa primeira análise para as precisões de referência, e com base na fórmula fundamental da teoria de erros, foi estudada a propagação do majorante do erro absoluto em todos os parâmetros obtidos com o ensaio, que permitiu concluir o impacto significativo destes no dimensionamento de obras de engenharia.

De seguida procedeu-se à avaliação da evolução do erro com o aumento da precisão dos equipamentos de medida, que permitiu concluir a possibilidade de redução do majorante do erro para valores mais próximos de 10%. Reforça-se desta forma a importância de melhorar a qualidade dos equipamentos de leitura utilizados actualmente.

Pôde-se também concluir que a qualidade dos resultados obtidos com o pressiómetro não é tão precisa quanto a do Dilatómetro de Marchetti (na linha do que foi defendido por Mateus (2008)).

Finalmente, o estudo realizado permitiu reforçar a importância de elaborar estudos do mesmo tipo para os restantes ensaios *in situ* e laboratoriais utilizados actualmente na dedução de parâmetros para dimensionamento, sugerindo-se desta forma a sua abordagem futura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amar, S., Jezequel, J.F., (1972) "Essais en place et en laboratoire sur les sols coherent: comparaison des resultats" Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts e Chaussees. No 58. Mars Avril.

Amar, S. L.C.P.C., Clarke, B.G.F., Gambin, M.P., Orr, T.L.L., (1991) "The application of pressuremeter test results to foundation design in Europe: A State-of-the-Art". ISSMFE European Technical Committee on Pressuremeters, Part 1 Predrilled Pressuremeters and Self Boring Pressuremeters. A.A. Balkema.Rotterdam.Brookfield

ASTM D4719-87 Standard Test Methods for Pressuremeter Testing in Soils

Baguelin,F.; Bustamante, M. e Frank, R.A.(1986). "The pressuremeter for foundations:French experience" ASCE Geotechnical Special Publication,nº6:Use of in situ tests in Geotechnical Engineering.Virginia.

Baguelin, F. , Jézequel, J.F , Lemée, E. e Méhauté, A. (1972)." Expansion of cylindrical probes in cohesive soils". Soil Mech. Found. Div. 98, SM 11, 1129-1142 pags.

Baguelin, F., Jézéquel, J.F. e Shields, D.H. (1978) – "The Pressuremeter and Foundation Engineering"Trans Tech publicantions. Clausthal, Germany.

Bosch, D., Mántaras, F. M. e Schnaid, F. (1997). "Previsão de parâmetros geotécnicos em solos coesivos friccionais através do Ensaio Pressiométrico." Solos e Rochas. São Paulo. ABMS, vol 20, nº1.

Briaud, H. L. (1992). The Pressuremeter", Trans Tech Publications, Rotterdã: A.A.Balkema.

Carrington da Costa, J.; Teixeira, C.. Lisboa 1957. Noticia Explicativa da Folha 9-C Porto. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Serviços Geológicos de Portugal.

Cavalcante, E.H. (1997) 'Contribuição do estudo do comportamento tensão-deformação de um depósito de argila mole da cidade de recife, através da utilização do Pressiómetro de Ménard".Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Paraiba.

Cestari, F (1990). "Prove Geotecniche In Sito". I Edizione. Ed. Geograph s.n.c, pp. Segrate

- Chiossi, N.J. (1979) "Geologia Aplicada à Engenharia"- 2 edição. Grémio Politécnico, São Paulo.
- Choffat, P., Bensaude, A.(1912) " Estudos sobre o sismo do Ribatejo de 23 de Abril de 1909". Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa
- Clarke,B.G(1995)-"Pressuremeter in Geotechnical Design".Chapman & Hall, Cambridge, Grã-Bretanha.
- Cruz, N. (1995). "A avaliação de Parâmetros Geotécnicos pelo Dilatómetro de Marchetti". Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- Cruz, N., Mateus, C., Cruz, M., Cruz, I. (2008) – "Determinação dos erros de medição associados a ensaios "In Situ"". O caso do Ensaio DMT". XI - Congresso Nacional de Geotecnia", Coimbra.
- Deere & Patton (1971). "Slope Stability in Residual Soils". 4 COPAMSEF, State of the Art., vol.1, pp.87-170.
- EPRI, (1990) "Manual on estimating Soil Properties for Foundation Design", Cornell University Ithaca, New York.
- Fahey M., Randolph M.F. (1984). "Effect of disturbance on Parameters Derived from Self-Boring Pressuremeter Tests in Sand". Geotechnique 34, Nº1.
- Furtado, K da F. (1998) " Avaliação de parâmetros de Resistência e Deformabilidade em solos arenosos da cidade de J.Pessoa, através do Pressiômetro de Ménard." Dissertação de Mestrado. DEC/UCFPB. Campina Grande.
- Gambin M. (1980). "A Review of the Pressuremeter over the Last Twenty Years in Europe". Sols Soil nº 32.
- Gibson.R.E & Anderson (1961). "In situ measurement of soil properties with the pressuremeter"Civil Engineering,May,London.
- Hough, B. K (1957). " Basic soil engineering". Ronald Press, New York.
- Hughes, J.M.O; Wroth, C.P.; Windle, D. (1977)."Pressuremeter tests in sands". Géotechnique 27,Nº4,pp.455-477.

Hutton,J.,1795. "Theory of the Earth; with proofs and illustrations". Edinburgh: Creech. 2 vols.

José F. Vigil, Kate E. Barton, David G. Howell,(2000) "The North America Tapestry of Time and Terrain" Geologic Investigations Series I-2781

Kratz de Oliveira, L.A.; Schnaid, F e Gehling,W.Y.Y(2000)"Uso de ensaios pressiométricos na previsão do potencial colapso de solos".Solos e Rochas, São Paulo.

Kruskall, W. H., Wallis, W., A. (1952). "Use of ranks in one-criterion variance analysis". Psychometrika. 29: 115-129.

Ladanyi, B. (1972). " In situ determination of undrained stress-strain behaviour of sensitive claus with pressuremeter. Canad. Geotech 9. 313-319 pags.

Lamé, G. (1952). 'Leçons sur la theorie mathématique de l'élasticité dès corps solides'. Bachelier,Paris.

Little,A. (1969). "The engineering classification of residual tropical soils. Proc.7th Int. On Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City.

Lunne,T; Robertson,P.K;Powell,J.J.M(1997) "Cone Penetration Testing in Geotechnical Praticce". Chapman&Hall, London.

Lunne,T. e Powel,J.J.M (1993). "Recent Developments in Situ Testing in offshore soil investigations." Norwegian Geotechnical Institute. Publication Nr.190. Oslo

Mair R.J., Wood D.M (1987). "Pressuremeter Testing Methods and Interpretations". CIRIA Ground. Eng. Report: In Situ Testing

Mántaras, F.M e Schnaid, F.(2001) - Teoria de Expansão de cavidade cilíndrica". Caderno técnico, PPGEC-UFRGS, Porto Alegre.

Manuppela, G.; Ramalho, M.; Telles Antues; A. Pais,J.. Lisboa 1987. Noticia Explicativa da Folha 53-B Tavira. Serviços Geológicos de Portugal.

Marchetti, S. (1980). "In Situ test by Flat Dilatometer". Jnl. Geotech. Engrg. Div., Vol 106, No 3, Mar, pp. 299 – 321. ASCE, New York.

Marchetti, S. (1997). "The Flat Dilatometer: Design Applications" Proc. 3rd Int. Geotechnical Engennering Conf. Cairo University.

Marcelo J. Devincenzi F. 2004 " Ingenieria Del Terreno" Ingeoter 4, Capítulo 1. U.D.Proyectos, E.T.S.I Minas – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid

Marques de Sá , J.P. (2007), "Applied Statistics using SPSS, Statistica, Matlab and R."Springer.

Mateus, C. (2008), "Determinação dos erros de medição associados ao ensaio DMT" Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.

Matos Fernandes, M. "Mecânica dos Solos - II Volume", Editorial da AEFEUP, 1995.

Matos Fernandes, M. (2006) "Mecânica dos Solos Conceitos e Princípios Fundamentais", FEUP, Porto

Mendonça, F. (2000). "O ensino da topografia associado à teoria dos erros". Sebenta da Disciplina de Topografia, do Departamento de engenharia Cartográfica – UFPE.

Ménard,L. Rousseau,J. (1962) –" L'évaluation dès tassements-tendances nouvelles. Sols Soils" Vol 1. June

Ménard, L. (1963a)- "Calcul de la force portante dès fondations sur la base dès resultats dès essais Pressiometriques". Sols Soils, Vol.2. June

Ménard, L. (1963b)- "Calcul de la force portante dès fondations sur la base dès resultats dès essais Pressiometriques, seconde partie: Resultats Experimentaux et conclusions". Sols Soils, Vol.6. September

Ménard, L. (1975) "The Ménard Pressuremeter, Interpretation and application of pressuremeter test results to Foundation Design" – Sols Soils.

Ménard L. (1976). "Regles Relatives à l'Execution des Essais Pressiométriques".Sols Soils n° 27.

Ménard Pressuremeter (1994) "Manual of Instructions" APAGEO/SEGELM.

NF P94-110 Essai pressiometrique Ménard

Orchant, C.J., Kulhawy, F.H.and Trautmann, C.H. (1988). "Reliability-Based Foundations Design for Transmission Line Structures,Critical evaluation of In Situ Test Methods". Report EL 5507, Vol2. Electric Power Research Institute, Palo Alto.

Pais; J. Moniz, C. Cabral, J.,Cardoso J.L.; Lehoinha, P.; Machado, S.; Morais, M.A.; Lourenço, C.; Ribeiro, M,L.; Henriques, P.; Falé, P.. Lisboa 2006. Noticia Explicativa da Folha 34D-Lisboa. Departamento de Geologia. Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação.

Palmer, A.C. (1972). "Undrained expansion of a cylindrical cavity in clay; a simple interpretation of the pressuremeter test". *Geotechnique* 22, 451-457pags.

Pinto, C.S (2002). "Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas". 2ª edição. Cap.3, 52-56p e Cap. 16, 331-341p ,

Press, F.; Siever, R. (1997) *Understanding Earth - 2nd edition*; W. H. Freeman and Company; New York

Publication No.FHWA-IP-89-008 "The Pressuremeter Test for Highway Applications", July 1989. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. McLean Virginia.

Reis, E. (1997). "Estatística Multivariada Aplicada". Edições Sílabo, Lisboa.

Rocha, R.B.; Ramalho, M.M.; Antunes, M.T.; Coelho, A.V.P.. Lisboa (1983). Noticia Explicativa da Folha 52-A. Portimão. Serviços Geológicos de Portugal.

Rodrigues, C.M.G (2003). "Projecto assistido por ensaios I, Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica". Dissertação de Mestrado, FCTUC.

Royston, P. "A pocket-calculator algorithm for the Shapiro-Francia test for non-normality:an application to medicine. *Statistics in Medicine*", 12, 181–184. 1993.

Sandroni, S.S; Brandt,J.R.T (1983) "Ensaio Pressiométricos em Solos Residuais Gnáissicos Jovens."Solos e Rochas, São Paulo.

Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965). "An analysis of variance test for normality (complete samples)"

Schnaid, F. (2000) – "Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações". 1ªedição,Oficina de Textos, São Paulo.

Schnaid, F.; Sills, G.C.; Consoli, N.C. (1995). "*Pressuremeter tests in unsaturated soils*". Proc.Int. Conf. Advances in site investigation practice. Eds C. Craig, Institution of Civil Engineers,London. pp. 586-597.

Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ottuño, L.; Oteo, C. (2002). "Ingeniería Geológica", Pearson Educación, Madrid.

Vigil, José F., Pike, J.R. Howell G.D. (2000) "A Tapestry of Time and Terrain" Geologic Investigations Series Map I-2720 USGS.

Vesic, A.S. (1972). "Principle of pile foundation design. School of engineering. Jnl Duke University, Soil Mech. Series, no. 38.

Vesic, A.S. (1975). "Expansion of cavities inside infinite soil mass". Jnl Soil. Mech. Fdns. Div., ASCE Volº98, No. SM3, March.

REFERÊNCIA ELECTRÓNICA

<http://www2.fisica.uminho.pt/Topicos%20de%20Fisica/Elementos%20de%20teoria%20de%20erros.html>

Acedido em: Janeiro 2009

<http://www.geocities.com/romulo1954/Teoriadoserros.html>

Acedido em: Janeiro 2009

<http://stattrek.com/AP-Statistics-4/Estimate-Slope.aspx?Tutorial=Stat>

Acedido em: Junho 2009

ANEXO

Código Geral

```
clear
clc

%d_nomedavariável é o majorante do erro da variável e v_nomedavariável
é o valor da variável
%Int= Tabela de parâmetros intermédios (cálculos auxiliares)
%Res= Tabela de resultados principais
%Tab= Tabela de parametros do ensaio
%Atr= Tabela de valores para cálculo do atrito

% Variáveis a Utilizar

syms p v v30 v60 z a b AA BB na nb R cc ph gamaw vm vs v0 vf cp0 p0 x
x2 indp cpf pf vf cpl pl vl epmt h dpl re_pl cpoisson alfa E dvv...
cu_pico cu_resid pef u0 nf Lzero ri r Ec s phicv corrp0 corrp0 corrp0
Rs Rc Rresid Rpico G0 Rg G r0 Fluencia ea_pico ea_resid

% Definir os dados Iniciais - Parametros fixos e seus erros

% (valor de constantes ('v') e erro associado ('d'))

dv=2.5; % erro de leitura do volume cm3
dp=0.125; % erro de leitura da pressão bar
vgamaw=9.81; % valor do peso volúmico da água KN/m3
dgamaw=0.005; % erro associado ao peso volúmico da água
vcpoisson=0.33; % coeficiente de poisson
dcpoisson=0.005;
dx=0.05;
dx2=0.005;
dindp=0.00005;
dphicv=0.00005;
vLzero=21.0; %cm
dLzero=0.05; %cm
dnf=0.5e-3; %m
dz=0.5e-3; %m
dh=0.5e-3; %m
vr0=2.9; %cm
dr0=0.05; %cm

%Dados de entrada

vz=input('Valor da profundidade do ensaio em metros (z)')
vh=input('Valor da altura de água no aparelho em metros (h)')
straux=input(' Qual o intervalo de células a importar para
calibração?')
('A Importar a matriz de dados...')
[AA,TXT,RAW]=xlsread('PMT2',1,straux);
na=size(AA,1);
Res=AA(:,1:2);
straux=input(' Qual o intervalo de células a importar das leituras?')
('A Importar a matriz de dados...')
[BB,TXT,RAW]=xlsread('PMT2',1,straux);
nb=size(BB,1);
Res(nb,30)=0;
Atr(nb,10)=0;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Erro associado a pressão %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:nb

    if Res(i,3)< 25;
        dp=0.125;

    else
        dp=0.25;
    end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Curva Pressiométrica

plot(Res(1:nb,3),Res(1:nb,5));
xlabel('Pressão (bar)');
ylabel('Volume 60s (cm3)');
title('Curva Pressiométrica de Ménard');

% Cálculo da diferença de volumes lidos aos 60s e 30s

Res(:,3)=BB(:,1);% p
Res(:,4)=BB(:,2);%v30
Res(:,5)=BB(:,3);%v60
Res(:,6)=Res(:,5)-Res(:,4);% Diferenças v60 v30

% Volume Inicial da Sonda vs

vs=pi*(r0^2)*Lzero;
Int(15,1)=double(subs(vs,{r0,Lzero},{vr0,vLzero}));
Int(16,1)=abs(double(subs(diff(vs,r0),{r0,Lzero},{vr0,vLzero}))*dr0..
.

+abs(double(subs(diff(vs,Lzero),{r0,Lzero},{vr0,vLzero}))*dLzero;
Int(17,1)=(abs(Int(16,1)/Int(15,1)))*100;

% Curva de Calibração da Pressão

plot(Res(1:na,1),Res(1:na,2));% plot (x,y)
xlabel('Pressão (bar)');
ylabel('Volume 60s (cm3)');
title('Curva de Calibração');

cc=polyfit(Res(1:na,1),Res(1:na,2),2);
Int(1:3,1)=cc;
Rc=corrcoef(Res(1:na,1),Res(1:na,2));
Int(2,2)=Rc(2,1);

% Cálculo da pressão Hidrostática ph

ph=(z+h)*gamaw/100;
Int(4,1)=double(subs(ph,{z,h,gamaw},{vz,vh,vgamaw}));

Int(5,1)=abs(double(subs(diff(ph,z),{z,h,gamaw},{vz,vh,vgamaw}))*dz..
.

```



```

+abs(double(subs(diff(ph,h),{z,h,gamaw},{vz,vh,vgamaw}))*dh...
+abs(double(subs(diff(ph,gamaw),{z,h,gamaw},{vz,vh,vgamaw}))*dgamaw;
    Int(6,1)=(abs(Int(5,1)/Int(4,1)))*100;

% Cálculo da Pressão Inicial p0 e do volume Inicial v0

    indicetemp1=min(find(Res(:,6)>1e-4))+1;
    Tab(1,1)=Res((indicetemp1),3); %p0
    Tab(4,1)=Res((indicetemp1),5);%v0

% Cálculo da Pressão de Fluencia pf e do volume de fluência vf

    dif_dif_pressao=diff(Res(:,6));
    indicetemp2=find(dif_dif_pressao>1);
    Tab(2,1)=Res((indicetemp2(2)),3);%pf
    Tab(5,1)=Res((indicetemp2(2)),5);%vf

    if indicetemp2(2)<=indicetemp1+1

        button = questdlg('Calcular p0 e pf manualmente','Escolher
primeiro p0 e depois pf','Sim','Não','Sim')

        if button=='Sim'
            plot(Res(:,3),Res(:,6),'+');
            xlabel('Pressão (bar)');
            ylabel('Volume60s - Volume 30s (cm3)');
            title('Curva de Fluencia');

            [temp,ind]=gname_p;
            indicetemp1=[ind(1)];
            indicetemp2=[0,ind(2)];
            Tab(1,1)=Res(ind(1),3);%p0
            Tab(2,1)=Res(ind(2),3);%pf
            Tab(4,1)=Res(ind(1),5);%v0
            Tab(5,1)=Res(ind(2),5);%vf
        end
    end

% Cálculo da Pressão Limite pl e o Volume Limite vl

syms vs

    vl=vs+2*v0; % vl
    Tab(6,1)=double(subs(vl,{vs,v0},{Int(15,1),Tab(4,1)}));

    Tab(6,3)=abs(double(subs(diff(vl,vs),{vs,v0},{Int(15,1),Tab(4,1)})))*I
nt(16,1)...

+abs(double(subs(diff(vl,v0),{vs,v0},{Int(15,1),Tab(4,1)})))*dv;
    Tab(6,4)=(abs(Tab(6,3)/Tab(6,1)))*100;

cplim=polyfit(Res((indicetemp2(2)):nb,3),log(Res((indicetemp2(2)):nb,5
)),1);
    Int(10,1)=exp(cplim(2));%a
    Int(11,1)=cplim(1);%b

```

```

da=0.0005;%
db=0.00005;

R=corrcoef(Res((indicetemp2(2)):nb,3),log(Res((indicetemp2(2)):nb,5)))
;
Int(12,1)=R(2,1);

syms v1

p1=(log(v1/a))/b;
Tab(3,1)=double(subs(p1,{v1,a,b},{Tab(6,1),Int(10,1),Int(11,1)}));

dpl=abs(double(subs(diff(p1,v1),{v1,a,b},{Tab(6,1),Int(10,1),Int(11,1)
}))) *dv...

+abs(double(subs(diff(p1,a),{v1,a,b},{Tab(6,1),Int(10,1),Int(11,1)})))
*da...

+abs(double(subs(diff(p1,b),{v1,a,b},{Tab(6,1),Int(10,1),Int(11,1)})))
*db;
re_pl=abs((dpl)/Tab(3,1));

% Correção de pressão

corrp0=(-x+(sqrt(((x*x)-(4*x2)*(indp-v0)))))/(2*x2);

Tab(1,5)=double(subs(corrp0,{x,x2,indp,v0},{Int(2,1),Int(1,1),Int(3,1)
,Tab(4,1)}));

Tab(1,6)=abs(double(subs(diff(corrp0,x),{x,x2,indp,v0},{Int(2,1),Int(1
,1),Int(3,1),Tab(4,1)}))) *dx...

+abs(double(subs(diff(corrp0,x2),{x,x2,indp,v0},{Int(2,1),Int(1,1),Int
(3,1),Tab(4,1)}))) *dx2...

+abs(double(subs(diff(corrp0,indp),{x,x2,indp,v0},{Int(2,1),Int(1,1),I
nt(3,1),Tab(4,1)}))) *dindp...

+abs(double(subs(diff(corrp0,v0),{x,x2,indp,v0},{Int(2,1),Int(1,1),Int
(3,1),Tab(4,1)}))) *dv;

corrpf=(-x+(sqrt(((x*x)-(4*x2)*(indp-vf)))))/(2*x2);

Tab(2,5)=double(subs(corrpf,{x,x2,indp,vf},{Int(2,1),Int(1,1),Int(3,1)
,Tab(5,1)}));

Tab(2,6)=abs(double(subs(diff(corrpf,x),{x,x2,indp,vf},{Int(2,1),Int(1
,1),Int(3,1),Tab(5,1)}))) *dx...

+abs(double(subs(diff(corrpf,x2),{x,x2,indp,vf},{Int(2,1),Int(1,1),Int
(3,1),Tab(5,1)}))) *dx2...

+abs(double(subs(diff(corrpf,indp),{x,x2,indp,vf},{Int(2,1),Int(1,1),I
nt(3,1),Tab(5,1)}))) *dindp...

+abs(double(subs(diff(corrpf,vf),{x,x2,indp,vf},{Int(2,1),Int(1,1),Int
(3,1),Tab(5,1)}))) *dv;

corrpl=(-x+(sqrt(((x*x)-(4*x2)*(indp-v1)))))/(2*x2);

```

```

Tab(3,5)=double(subs(corrpl,{x,x2,indp,vl},{Int(2,1),Int(1,1),Int(3,1),
Tab(6,1)}));

Tab(3,6)=abs(double(subs(diff(corrpl,x),{x,x2,indp,vl},{Int(2,1),Int(1,
1),Int(3,1),Tab(6,1)})))*dx...

+abs(double(subs(diff(corrpl,x2),{x,x2,indp,vl},{Int(2,1),Int(1,1),Int
(3,1),Tab(6,1)})))*dx2...

+abs(double(subs(diff(corrpl,indp),{x,x2,indp,vl},{Int(2,1),Int(1,1),I
nt(3,1),Tab(6,1)})))*dindp...

+abs(double(subs(diff(corrpl,vl),{x,x2,indp,vl},{Int(2,1),Int(1,1),Int
(3,1),Tab(6,1)})))*dv;

% Correção da Pressão Inicial p0

syms ph corrp0

cp0=p0+ph-corrp0;

Tab(1,2)=double(subs(cp0,{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1),Tab(1,5)}))
;

Tab(1,3)=abs(double(subs(diff(cp0,p0),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1
),Tab(1,5)})))*dp...

+abs(double(subs(diff(cp0,ph),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1),Tab(1,
5)})))*Int(5,1)...

+abs(double(subs(diff(cp0,corrp0),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1),Ta
b(1,5)})))*Tab(1,6);
Tab(1,4)=(abs(Tab(1,3)/Tab(1,2)))*100;

% Cálculo das derivadas parciais

Dpp0(:,1)=abs(double(subs(diff(cp0,p0),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,
1),Tab(1,5)})))*%p0
Dpp0(:,2)=dp;

Dpp0(:,3)=abs(double(subs(diff(cp0,ph),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,
1),Tab(1,5)})))*%ph
Dpp0(:,4)=Int(5,1);

Dpp0(:,5)=abs(double(subs(diff(cp0,corrp0),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),In
t(4,1),Tab(1,5)})))*%corrp0
Dpp0(:,6)=Tab(1,6);

Dpp0(:,7)=Dpp0(:,1)*Dpp0(:,2); %erro dp0
Dpp0(:,8)=Dpp0(:,3)*Dpp0(:,4); %erro dph
Dpp0(:,9)=Dpp0(:,5)*Dpp0(:,6); %erro dcorrp0

Dpp0(:,11)=Dpp0(:,7)+Dpp0(:,8)+Dpp0(:,9);

Dpp0(:,12)=Dpp0(:,7)/Dpp0(:,11);

```

```

Dpp0(:,13)=Dpp0(:,8)/Dpp0(:,11);
Dpp0(:,13)=Dpp0(:,9)/Dpp0(:,11);

if Tab(1,4)>=60; % Caso o erro relativo de p0 seja superior a 60%, a
escolha do ponto será feita manualmente.

    button = questdlg('Calcular p0 e pf manualmente','Escolher
primeiro p0 e depois pf','Sim','Não','Sim')

    if button=='Sim'
        plot(Res(:,3),Res(:,6),'+'); %curva fluencia
        xlabel('Pressão (bar)');
        ylabel('Volume60s - Volume 30s (cm3)');
        title('Curva de Fluencia');

        [temp,ind]=gname_p;
        indicetemp1=[ind(1)];
        indicetemp2=[0,ind(2)];
        Tab(1,1)=Res(ind(1),3);%p0
        Tab(2,1)=Res(ind(2),3);%pf
        Tab(4,1)=Res(ind(1),5);%v0
        Tab(5,1)=Res(ind(2),5);%vf
        flagg=1

        cp0=p0+ph-corrp0;

        Tab(1,2)=double(subs(cp0,{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1),Tab(1,5)}))
        ;

        Tab(1,3)=abs(double(subs(diff(cp0,p0),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1),
        Tab(1,5)})))*dp...

        +abs(double(subs(diff(cp0,ph),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1),Tab(1,
        5)})))*Int(5,1)...

        +abs(double(subs(diff(cp0,corrp0),{p0,ph,corrp0},{Tab(1,1),Int(4,1),Ta
        b(1,5)})))*Tab(1,6);
        Tab(1,4)=(abs(Tab(1,3)/Tab(1,2)))*100;
        end

    end

% Correção da Pressão de Fluencia pf

syms corpf
cpf=pf+ph-corrpf;

Tab(2,2)=double(subs(cpf,{pf,ph,corpf},{Tab(2,1),Int(4,1),Tab(2,5)}))
;

Tab(2,3)=abs(double(subs(diff(cpf,pf),{pf,ph,corpf},{Tab(2,1),Int(4,1),
Tab(2,5)})))*dp...

+abs(double(subs(diff(cpf,ph),{pf,ph,corpf},{Tab(2,1),Int(4,1),Tab(2,
5)})))*Int(5,1)...

+abs(double(subs(diff(cpf,corpf),{pf,ph,corpf},{Tab(2,1),Int(4,1),Ta
b(2,5)})))*Tab(2,6);
Tab(2,4)=(abs(Tab(2,3)/Tab(2,2)))*100;

```

```

% Correção da Pressão Limite pl

syms pl corrpl
cpl=pl+ph-corrpl;

Tab(3,2)=double(subs(cpl,{pl,ph,corrpl},{Tab(3,1),Int(4,1),Tab(3,5)}))
;

Tab(3,3)=abs(double(subs(diff(cpl,pl),{pl,ph,corrpl},{Tab(3,1),Int(4,1),Tab(3,5)})))
*dpl...

+abs(double(subs(diff(cpl,ph),{pl,ph,corrpl},{Tab(3,1),Int(4,1),Tab(3,5)})))
*Int(5,1)...

+abs(double(subs(diff(cpl,corrpl),{pl,ph,corrpl},{Tab(3,1),Int(4,1),Tab(3,5)})))
*Tab(3,6);

Tab(3,4)=(abs(Tab(3,3)/Tab(3,2)))*100;

% Cálculo do Volume Médio da cavidade vm

vm=vs+((v0+vf)/2);

Int(7,1)=double(subs(vm,{vs,v0,vf},{Int(15,1),Tab(4,1),Tab(5,1)}));

Int(8,1)=abs(double(subs(diff(vm,vs),{vs,v0,vf},{Int(15,1),Tab(4,1),Tab(5,1)})))
*Int(16,1)...

+abs(double(subs(diff(vm,v0),{vs,v0,vf},{Int(15,1),Tab(4,1),Tab(5,1)})))
*dv...

+abs(double(subs(diff(vm,vf),{vs,v0,vf},{Int(15,1),Tab(4,1),Tab(5,1)})))
*dv;

Int(9,1)=(abs(Int(8,1)/Int(7,1)))*100; % valor do erro relativo

% Cálculo do Módulo Pressiométrico de Ménard epmt

syms vm

epmt=2*(1+cpoisson)*vm*((pf-p0)/(vf-v0));

Tab(7,1)=double(subs(epmt,{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)})); % ter em conta os valores de pressão corrigidos

Tab(7,3)=abs(double(subs(diff(epmt,cpoisson),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)})))
*dcpoisson
...

+abs(double(subs(diff(epmt,vm),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)})))
*Int(8,1)...

+abs(double(subs(diff(epmt,pf),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)})))
*Tab(2,3)...

```

```

+abs(double(subs(diff(epmt,p0),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) *Tab(1,3)...

+abs(double(subs(diff(epmt,vf),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) *dv...

+abs(double(subs(diff(epmt,v0),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) *dv;

Tab(7,4)=(abs(Tab(7,3)/Tab(7,1)))*100;

DpEPMT(:,1)=abs(double(subs(diff(epmt,cpoisson),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) ;
%cpoisson
DpEPMT(:,2)=dcpoisson;

DpEPMT(:,3)=abs(double(subs(diff(epmt,vm),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) ; %vm
DpEPMT(:,4)=Int(8,1);

DpEPMT(:,5)=abs(double(subs(diff(epmt,pf),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) ; %pf
DpEPMT(:,6)=Tab(2,3);

DpEPMT(:,7)=abs(double(subs(diff(epmt,p0),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) ; %p0
DpEPMT(:,8)=Tab(1,3);

DpEPMT(:,9)=abs(double(subs(diff(epmt,vf),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) ; %vf
DpEPMT(:,10)=dv;

DpEPMT(:,11)=abs(double(subs(diff(epmt,v0),{cpoisson,vm,pf,p0,vf,v0},{vcpoisson,Int(7,1),Tab(2,2),Tab(1,2),Tab(5,1),Tab(4,1)}))) ; %v0
DpEPMT(:,12)=dv;

DpEPMT(:,13)=DpEPMT(:,1)*DpEPMT(:,2);
DpEPMT(:,14)=DpEPMT(:,3)*DpEPMT(:,4);
DpEPMT(:,15)=DpEPMT(:,5)*DpEPMT(:,6);
DpEPMT(:,16)=DpEPMT(:,7)*DpEPMT(:,8);
DpEPMT(:,17)=DpEPMT(:,9)*DpEPMT(:,10);
DpEPMT(:,18)=DpEPMT(:,11)*DpEPMT(:,12);

DpEPMT(:,19)=DpEPMT(:,13)+DpEPMT(:,14)+DpEPMT(:,15)+DpEPMT(:,16)+DpEPMT(:,17)+DpEPMT(:,18);

DpEPMT(:,20)=(DpEPMT(:,13)/DpEPMT(:,19))*100;
DpEPMT(:,21)=(DpEPMT(:,14)/DpEPMT(:,19))*100;
DpEPMT(:,22)=(DpEPMT(:,15)/DpEPMT(:,19))*100;
DpEPMT(:,23)=(DpEPMT(:,16)/DpEPMT(:,19))*100;

```

```

DpEPMT(:,24)=(DpEPMT(:,17)/DpEPMT(:,19))*100;
DpEPMT(:,25)=(DpEPMT(:,18)/DpEPMT(:,19))*100;

% Parâmetros Geotécnicos

% Cálculo do Módulo de Distorção G0 pelo método analítico

syms epmt

G=epmt/(2.6600);
Tab(8,1)=double(subs(G,{epmt},{Tab(7,1)}));

Tab(8,3)=abs(double(subs(diff(G,epmt},{epmt},{Tab(7,1)})))*Tab(7,3)
Tab(8,4)=(abs(Tab(8,3)/Tab(8,1)))*100;

% % Cálculo do Módulo de Distorção G0 pelo método Gráfico
(gráfico x= dv/v vs y=p fase elástica)

% Cálculo da Variação Volumétrica

for i=3:nb

    dvv=(v60-v0)/(vs+v0+v60);

    Res(i,7)=double(subs(dvv,{v60,v0,vs,v0,v60},{Res(i,5),Tab(4,1),Int(15,
1),Tab(4,1),Res(i,5)}));

    Res(i,8)=abs(double(subs(diff(dvv,v60},{v60,v0,vs,v0,v60},{Res(nb,5),T
ab(4,1),Int(15,1),Tab(4,1),Res(nb,5)})))*dv...

+abs(double(subs(diff(dvv,v0},{v60,v0,vs,v0,v60},{Res(nb,5),Tab(4,1),I
nt(15,1),Tab(4,1),Res(nb,5)})))*Tab(4,3)...

+abs(double(subs(diff(dvv,vs},{v60,v0,vs,v0,v60},{Res(nb,5),Tab(4,1),I
nt(15,1),Tab(4,1),Res(nb,5)})))*Int(16,1)...

+abs(double(subs(diff(dvv,v0},{v60,v0,vs,v0,v60},{Res(nb,5),Tab(4,1),I
nt(15,1),Tab(4,1),Res(nb,5)})))*Tab(4,3)...

+abs(double(subs(diff(dvv,v60},{v60,v0,vs,v0,v60},{Res(nb,5),Tab(4,1),
Int(15,1),Tab(4,1),Res(nb,5)})))*dv;

    if Res(i,7)==0
        Res(i,9)==0;
        Res(i,10)==0;
    else
        Res(i,9)=(abs(Res(i,8)/Res(i,7)))*100;
        Res(i,10)=log(Res(i,7));

        Res(i,11)=(Res(i,7)+Res(i,8));
        Res(i,12)=(Res(i,7)-Res(i,8));

        Res(i,13)=log(Res(i,11));
        Res(i,14)=log(Res(i,12));

        Res(i,15)=Res(i,3)+dp;
        Res(i,16)=Res(i,3)-dp;

```

```

end
end

xg=Res(4:indicetemp2(2),7);
xg1=Res(4:indicetemp2(2),12);
xg2=Res(4:indicetemp2(2),11);

yg=Res(4:indicetemp2(2),3);
yg1=Res(4:indicetemp2(2),16);
yg2=Res(4:indicetemp2(2),15);

Xg0=[xg;xg1;xg1;xg2;xg2];
Yg0=[yg;yg2;yg1;yg2;yg1];

% Cálculo do Módulo de Distorção G0 pelo método Gráfico

plot(Xg0,Yg0,'+');
xlabel('Variação volumétrica');
ylabel('Pressão (bar)');
title('Módulo G - Fase Elástica');

G0=polyfit(Xg0,Yg0,1);
Tab(12,1)=G0(1); % bar
Rg=corrcoef(Xg0,Yg0);
Tab(12,2)=Rg(2,1);

n1=size(Xg0);

Erros(3,2)=sqrt(sum(((Yg0)-polyval(G0,Xg0)).^2)/(n1(1)-2));
Erros(3,3)=sqrt(sum(((Xg0) - mean(Xg0)).^2));

Tab(12,3)=(Erros(3,2)/Erros(3,3));
Tab(12,4)=(abs(Tab(12,3)/Tab(12,1)))*100;

% Módulo de Deformabilidade E

sd=input('')
Resp=input('Qual o tipo de solo?
(Argila=0,Silte=1,Areia=2,Areia_e_Pedregulho=3,Rocha=4)')

if Resp==0
    alfa=0.66;

elseif Resp==1
    alfa=0.5;

elseif Resp==2
    alfa=0.33;

elseif Resp==3
    alfa=0.25;

else Resp==0
    alfa=0.25;

end

```



```

dalfa=0.005;

syms epmt

E=epmt/alfa;
Tab(9,1)=double(subs(E,{epmt,alfa},{Tab(7,1),dalfa}));

Tab(9,3)=abs(double(subs(diff(E,epmt),{epmt,alfa},{Tab(7,1),dalfa}))) *
Tab(7,3)...

+abs(double(subs(diff(E,alfa),{epmt,alfa},{Tab(7,1),dalfa}))) *dalfa;

Tab(9,4)=(abs(Tab(9,3)/Tab(9,1)))*100;

% Coesão não drenada

plot(Res((indicetemp1+2):indicetemp2(2),10),Res((indicetemp1+2):indice
temp2(2),3)); % Gráfico com y= Pressão e x=ln dv/v
xlabel('Log Variação Volumétrica');
ylabel('Pressão (bar)');
title('Coesão não drenada Cu');

% Cu de pico = declive na fase elástica % Gráfico com y= Pressão e
x=ln dv/v

xp=Res(5:indicetemp2(2),10);
xp1=Res(5:indicetemp2(2),14);
xp2=Res(5:indicetemp2(2),13);

yp=Res(5:indicetemp2(2),3);
yp1=Res(5:indicetemp2(2),16);
yp2=Res(5:indicetemp2(2),15);

XPico=[xp;xp1;xp1;xp2;xp2];
YPico=[yp;yp2;yp1;yp2;yp1];

plot(XPico,YPico,'+');
xlabel('Ln Variação volumétrica');
ylabel('Pressão (bar)');
title('Coesão Pico - Fase Elástica');

cu_pico=polyfit(XPico,YPico,1);
Tab(10,1)=cu_pico(1);
Rpico=corrcoef(XPico,YPico);
Tab(10,2)=Rpico(2,1);

n2=size(XPico);

Erros(1,2)=sqrt(sum(((YPico)-polyval(cu_pico,XPico)).^2)/(n2(1)-
2));
Erros(1,3)=sqrt(sum(((XPico)-mean(XPico)).^2));

Tab(10,3)=(abs(Erros(1,2)/Erros(1,3)));

```

```

Tab(10,4)=(abs(Tab(10,3)/Tab(10,1)))*100;

% Cu residual = declive na fase plástica do gráfico x= Pressão
60s e y=ln dv/v

xr=Res(indicetemp2(2):nb,10);
xr1=Res(indicetemp2(2):nb,14);
xr2=Res(indicetemp2(2):nb,13);

yr=Res(indicetemp2(2):nb,3);
yr1=Res(indicetemp2(2):nb,16);
yr2=Res(indicetemp2(2):nb,15);

Xresid=[xr;xr1;xr1;xr2;xr2];
Yresid=[yr;yr2;yr1;yr2;yr1];

plot(Xresid,Yresid,'+');
xlabel('Ln Variação volumétrica');
ylabel('Pressão (bar)');
title('Coesão Residual - Fase Plástica');

cu_resid=polyfit(Xresid,Yresid,1);
Tab(11,1)=cu_resid(1);
Rresid=corrcoef(Xresid,Yresid);
Tab(11,2)=Rresid(2,1);

n3=size(Xresid);

Erros(2,2)=sqrt(sum(((Yresid)-
polyval(cu_resid,Xresid)).^2)/(n3(1)-2));% ei quadrado
Erros(2,3)=sqrt(sum(((Xresid)-mean(Xresid)).^2)); %(xi-media_x)

Tab(11,3)=Erros(2,2)/Erros(2,3);
Tab(11,4)=(abs(Tab(11,3)/Tab(11,1)))*100;

% 1.Ângulo de atrito interno phi e ângulo de dilatação psi

%1.1-Cálculo da tensão neutra

vnf=input('Valor Nivel Freático em metros');

u0=((z-nf)*gamaw)/100;
Atr(1,1)=double(subs(u0,{z,nf,gamaw},{vz,vnf,vgamaw}));

Atr(2,1)=abs(double(subs(diff(u0,z),{z,nf,gamaw},{vz,vnf,vgamaw}))*dz
...
+abs(double(subs(diff(u0,nf),{z,nf,gamaw},{vz,vnf,vgamaw}))*dnf...
+abs(double(subs(diff(u0,gamaw),{z,nf,gamaw},{vz,vnf,vgamaw}))*dgamaw
;
Atr(3,1)=(abs(Atr(2,1)/Atr(1,1)))*100;

%1.2-Cálculo da pressão efectiva

for i=1:nb
syms u0

```

```

    pef=(p-u0)*100;

    Atr(i,3)=double(subs(pef,{p,u0},{Res(i,3),Atr(1,1)}));

Atr(i,4)=abs(double(subs(diff(pef,p),{p,u0},{Res(i,3),Atr(1,1)})))*dp.
..
+abs(double(subs(diff(pef,u0),{p,u0},{Res(i,3),Atr(1,1)})))*Atr(2,1);

    if Atr(i,3)==0

        Atr(i,5)=0;
        Atr(i,6)=0;

    else
        Atr(i,5)=(abs(Atr(i,4)/Atr(i,3)))*100;
        Atr(i,6)=log(Atr(i,3));

    end

```

%1.3- Cálculo do raio interno da sonda ri

```

    ri=sqrt((vs+v0)/(Lzero*pi));

Atr(4,1)=double(subs(ri,{vs,v0,Lzero},{Int(15,1),Tab(4,1),vLzero}));

Atr(5,1)=abs(double(subs(diff(ri,vs),{vs,v0,Lzero},{Int(15,1),Tab(4,1),vLzero})))
*Int(16,1)...

+abs(double(subs(diff(ri,v0),{vs,v0,Lzero},{Int(15,1),Tab(4,1),vLzero})))
)*dv...

+abs(double(subs(diff(ri,Lzero),{vs,v0,Lzero},{Int(15,1),Tab(4,1),vLzero})))
)*dLzero;
    Atr(6,1)=(abs(Atr(5,1)/Atr(4,1)))*100;

```

%1.4- Cálculo do raio de expansão da sonda r

```

    r=sqrt((vs+v60)/(Lzero*pi));

Atr(i,7)=double(subs(r,{vs,v60,Lzero},{Int(15,1),Res(i,5),vLzero}));

Atr(i,8)=abs(double(subs(diff(r,vs),{vs,v60,Lzero},{Int(15,1),Res(i,5),vLzero})))
*Int(16,1)...

+abs(double(subs(diff(r,v60),{vs,v60,Lzero},{Int(15,1),Res(i,5),vLzero})))
)*dv...

+abs(double(subs(diff(r,vLzero),{vs,v60,Lzero},{Int(15,1),Res(i,5),vLzero})))
)*dLzero;
    Atr(i,9)=(abs(Atr(i,8)/Atr(i,7)))*100;

```

% 1.5 Cálculo da expansão da cavidade Ec

```

syms ri r

Ec=((r-ri)/ri)*100;

Atr(i,10)=double(subs(Ec,{r,ri},{Atr(i,7),Atr(4,1)}));

Atr(i,11)=abs(double(subs(diff(Ec,r),{r,ri},{Atr(i,7),Atr(4,1)})))*Atr
(i,8)...

+abs(double(subs(diff(Ec,ri),{r,ri},{Atr(i,7),Atr(4,1)})))*Atr(5,1);

if Atr(i,10)>0
    Atr(i,12)=(abs(Atr(i,11)/Atr(i,10)))*100;
    Atr(i,13)=log(Atr(i,10));
else
    Atr(i,12)=0;
    Atr(i,13)=eps;
end
end

plot(Atr(indicetemp2(2):nb,13),Atr(indicetemp2(2):nb,6));
xlabel('Expansão da cavidade');
ylabel('Pressão efectiva');
title('Atrito e Dilatância');

% Calculo do erro associado ao parametro s obtido pelo declive

for i=indicetemp2(2):nb

    Atr(i,14)=(Atr(i,3)+Atr(i,4));
    Atr(i,15)=(Atr(i,3)-Atr(i,4));

    Atr(i,16)=log(Atr(i,14));
    Atr(i,17)=log(Atr(i,15));

    Atr(i,18)=(Atr(i,10)+Atr(i,11));
    Atr(i,19)=(Atr(i,10)-Atr(i,11));

    Atr(i,20)=log(Atr(i,18));
    Atr(i,21)=log(Atr(i,19));

end

%Ln Expansão da Cavidade

xs=Atr(indicetemp2(2)+2:nb,13);
xs1=Atr(indicetemp2(2)+2:nb,21);
xs2=Atr(indicetemp2(2)+2:nb,20);

%Ln Pressão Efectiva

ys=Atr(indicetemp2(2)+2:nb,6);
ys1=Atr(indicetemp2(2)+2:nb,17);
ys2=Atr(indicetemp2(2)+2:nb,16);

Xs=[xs;xs1;xs1;xs2;xs2];

```

```

Ys=[ys;ys2;ys1;ys2;ys1];

plot(Xs,Ys,'+');
xlabel('Expansão da cavidade');
ylabel('Pressão efectiva');
title('Atrito e Dilatância');

s=polyfit(Xs,Ys,1);
Atr(7,1)=s(1);
Rs=corrcoef(Xs,Ys);
Atr(7,2)=Rs(2,1);

% Calculo do erro associado ao parametro s obtido pelo declive

n4=size(Xs);

Erros(4,2)=sqrt(sum((Ys-polyval(s,Xs)).^2)/(n4(1)-2));
Erros(4,3)=sqrt(sum((Xs-mean(Xs)).^2));

ds=(abs(Erros(4,2)/Erros(4,3)));
Erros(4,4)=(abs(ds/Atr(7,1)))*100;

% Angulo de atrito

phicv=input('Valor do angulo de atrito a volume constante (phicv)');

phicvrad=(phicv*pi)/180;

syms s

phi=s/(1+(s-1)*sin(phicvrad));

Atr(8,1)=double(subs(phi,{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad}));

Atr(9,1)=abs(double(subs(diff(phi,s),{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad}
))*ds...

+abs(double(subs(diff(phi,phicvrad),{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad})))
)*dphicv;
Atr(10,1)=(abs(Atr(9,1)/Atr(8,1)))*100;
Atr(14,1)=asin(Atr(8,1));
Atr(15,2)=(Atr(14,1)*180)/pi;

% Cálculo das derivadas parciais

DpEPMT(:,27)=abs(double(subs(diff(phi,s),{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad}
)));
DpEPMT(:,28)=ds;

DpEPMT(:,29)=abs(double(subs(diff(phi,phicvrad),{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad}
)));
DpEPMT(:,30)=dphicv;

```

```

DpEPMT(:,31)=DpEPMT(:,27)*DpEPMT(:,28);
DpEPMT(:,32)=DpEPMT(:,29)*DpEPMT(:,30);

DpEPMT(:,33)=DpEPMT(:,31)+DpEPMT(:,32);

DpEPMT(:,34)=(DpEPMT(:,31)/DpEPMT(:,33))*100;
DpEPMT(:,35)=(DpEPMT(:,32)/DpEPMT(:,33))*100;

% Angulo de dilataancia

psi=s+(s-1)*sin(phicvrad); % valor do sen(psi)

Atr(11,1)=double(subs(psi,{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad}));
Atr(12,1)=abs(double(subs(diff(psi,s),{s,phicv},{Atr(7,1),phicvrad})))
*ds...

+abs(double(subs(diff(psi,phicvrad),{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad})))
)*dphicv;
Atr(13,1)=(abs(Atr(12,1)/Atr(11,1)))*100;
Atr(16,1)=asin(Atr(11,1));
Atr(17,2)=(Atr(16,1)*180)/pi;

% Cálculo das derivadas parciais

DpEPMT(:,37)=abs(double(subs(diff(psi,s),{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad})))
ad})));
DpEPMT(:,38)=ds;

DpEPMT(:,39)=abs(double(subs(diff(psi,phicvrad),{s,phicvrad},{Atr(7,1),phicvrad})))
);
DpEPMT(:,40)=dphicv;

DpEPMT(:,41)=DpEPMT(:,37)*DpEPMT(:,38);
DpEPMT(:,42)=DpEPMT(:,39)*DpEPMT(:,40);

DpEPMT(:,43)=DpEPMT(:,41)+DpEPMT(:,42);

DpEPMT(:,44)=(DpEPMT(:,41)/DpEPMT(:,43))*100;
DpEPMT(:,45)=(DpEPMT(:,42)/DpEPMT(:,43))*100;

xlswrite('ResultadosRes',Res)
xlswrite('ResultadosInt',Int)
xlswrite('ResultadosTab',Tab)
xlswrite('ResultadosAtr',Atr)
xlswrite('ResultadosErros',Erros)
xlswrite('ResultadosDpEPMT',DpEPMT)

```

Função gname

```
function [hh,c0]=gname(cases,line_handle)
%GNAME Labels plotted points with their case names or case number.
% GNAME(CASES) displays the graph window, puts up a cross-hair, and
% waits for a mouse button or keyboard key to be pressed. You can
% position the cross-hair with the mouse and click once near each
% point to see a label on that point. Alternatively you can drag
% a selection rectangle to label all points in the rectangle. Click
% with the right mouse button to remove labels. When you are done,
% press the enter or escape key to stop labeling. CASES can be a
cell
% array of strings, or a string array with each row being the case
name
% of a point.
%
% GNAME with no arguments labels each case with its case number. It
% also uses the case number as a label if the number of names in
CASES
% does not match the number of points on the line you select.
%
% HH = GNAME(CASES,LINE_HANDLE) returns a vector of handles
% to the text objects on the plot. Use the scalar, LINE_HANDLE, to
% specify a subset of the lines to label. The default behavior
% is to label all lines on the plot (except those with a line
% style of '-', '--', or '-.' when there are multiple lines).
%
% See also TEXT, GINPUT, RBBOX.

% Copyright 1993-2004 The MathWorks, Inc.
% $Revision: 2.15.2.3 $ $Date: 2004/04/01 16:23:37 $

[az el] = view;
if az ~= 0 || el ~= 90
    error('stats:gname:BadView','View must be two-dimensional.');
```

```
end
if (nargin < 1), cases = []; end
if (nargin < 2), line_handle = []; end
a = findobj(gcf, 'Type', 'axes');
if (length(a) < 2)
    [h,c0]=gnamesub(cases,line_handle);
else
    h = [];
    bigax = gca;
    set(gcf, 'CurrentAx',bigax)
    [x0,y0,x1,y1] = ginput0(1);
    while (length(x0)>0)
        % Invoke subroutine with current axes set properly
        [h0,c00] = gnamesub(cases,line_handle,x0,y0,x1,y1);
        h = [h; h0(:)];
        c00=[c00;c0]
        % Get next mouse click
        set(gcf, 'CurrentAx',bigax)
        [x0,y0,x1,y1] = ginput0(1);
    end
    set(gcf, 'CurrentAx',bigax)
end
```

```

if nargout > 0
    hh = h(ishandle(h));
end

% -----
function [h,c]=gnamesub(cases,line_handle,x0,y0,x1,y1)
% If no line handles supplied, get lines that appear to be plots of
% data rather than fits. (See the lsline function.)
h = [];
c=[];
if nargin < 2, line_handle=[]; end
patches = findobj(gca, 'Type','patch');
if (length(line_handle)==0 && length(patches)==0)
    line_handle = findobj(gca,'type','line');
    tmp = line_handle;
    for j=length(line_handle):-1:1
        style = get(line_handle(j),'LineStyle');
        if (strcmp(style,'-') || strcmp(style,'--') || strcmp(style,'-.'))
            line_handle(j) = [];
        end
    end
    if (length(line_handle)==0), line_handle = tmp; end
end

nlines = length(line_handle);
if (nargin<1), cases = []; end
if iscell(cases)
    ncases = length(cases);
else
    ncases = size(cases,1);
end

% Get all (x,y) values that may be labeled
u = get(gca, 'UserData');
specialgraph = 0; % from a special plotting function?
if (iscell(u))
    if (strcmp(u{1}, 'gscatter'))
        specialgraph = 1;
    elseif (strcmp(u{1}, 'boxplot'))
        specialgraph = 2;
    end
end
if (specialgraph == 1)
    % If from the gscatter function, userdata has useful information
    xdat = u{2};
    ydat = u{3};
    n = size(xdat,1);
    nx = size(xdat,2);
    ny = size(ydat,2);
    if (nx>1)
        ydat = repmat(ydat,nx);
        xdat = xdat(:);
    elseif (ny>1)
        xdat = repmat(xdat,ny);
        ydat = ydat(:);
    end
    casenums = repmat((1:n)', max(nx,ny), 1);
    if (n == ncases), casenums = -casenums; end
elseif (specialgraph == 2)
    % From the boxplot function

```



```

ydat = u{2};
xdat = u{3};
vert = u{4};
if isempty(xdat)
    if size(ydat,2)==1
        xdat = ones(size(ydat));
    else
        xdat = repmat(1:size(ydat,2),size(ydat,1),1);
        ydat = ydat(:);
        xdat = xdat(:);
    end
end
if ~isequal(ver,1) % swap x/y for horizontal boxes
    tmp = xdat;
    xdat = ydat;
    ydat = tmp;
end
n = size(ydat,1);
casenums = (1:n)';
if (n == ncases), casenums = -casenums; end

elseif (nlines == 0)
    % If from the scatter function, graph may have patches rather than
    lines.
    if (isempty(patches))
        error('stats:gname:NoLine','Did not find a line to label.');
```

end

```

    par = get(patches(1),'Parent');
    if isequal(get(par,'Type'),'hgggroup')
        % In R14 and beyond scatter patches are part of an hgggroup
        xdat = get(par,'XData');
        ydat = get(par,'YData');
```

else

```

        % The R13 method that may no longer be required
        xdat = get(patches,'XData');
        if (~iscell(xdat)), return; end
        xdat = cat(1,xdat{:});
        ydat = get(patches,'YData');
        ydat = cat(1,ydat{:});
        xdat = xdat(end:-1:1); % note that child order is in reverse
        ydat = ydat(end:-1:1);
    end
    nx = length(xdat);
    if (nx == ncases)
        casenums = -1:-1:-nx; % negative numbers to use values of
cases
    else
        casenums = 1:nx;
    end
end

else
    xdat = get(line_handle,'XData');
    ydat = get(line_handle,'YData');
```

if (nlines == 1)

```

        nx = length(xdat);
        if (nx == ncases)
            casenums = -(1:nx);
        else
            casenums = 1:nx;
        end
    end
end
end

```

```

    for j=1:nlines
        nx = length(xdat{j,1});
        if (nx == ncases)
            xdat{j,2} = -(1:nx);
        else
            xdat{j,2} = 1:nx;
        end
    end
    casenums = cat(2,xdat{: ,2});
    xdat = cat(2,xdat{: ,1});
    ydat = cat(2,ydat{:});
end
end

% Prep axes for this operation
units = get(gca,'defaulttextunits');
set(gca,'defaulttextunits','data');
bmf = get(gcf,'WindowButtonMotionFcn');
bdf = get(gcf,'WindowButtonDownFcn');
set(gcf,'WindowButtonMotionFcn','');
set(gcf,'WindowButtonDownFcn','');
xrange = diff(get(gca,'Xlim'));
yrange = diff(get(gca,'Ylim'));

% Get click location, then place label at the appropriate point
if (nargin<3), [x0,y0,x1,y1] = ginput(1); end
h = [];
while(~isempty(x0))
    rectangular = (x0 ~= x1) && (y0 ~= y1); % is this a rubber band
    selection?

    % Get distance from each symbol to selection (box or point)
    xd = max(0, (x0-xdat)/xrange) + max(0, (xdat-x1)/xrange) +
~isfinite(xdat);
    yd = max(0, (y0-ydat)/yrange) + max(0, (ydat-y1)/yrange) +
~isfinite(ydat);
    d = xd.*xd + yd.*yd;
    [d1,idx] = min(d);
    if (rectangular) % select all points in rectangle
        idx = find(d<=0);
    elseif d1>2*0.05^2
        idx = []; % select nothing if too far away
    end

    if (length(idx) > 0) % if any points were selected
        c0 = casenums(idx); % get case numbers or labels
        c=[c;c0]
        if (c0 < 0)
            if iscell(cases)
                t0 = cases(-c0);
            else
                t0 = cases(-c0,:);
            end
        else
            t0 = strjust(int2str(c0(:)), 'left');
        end
        x0 = xdat(idx); % get coordinates
        y0 = ydat(idx);

        % Regular or ctrl/alt selection?

```

```

        adding = ~isequal(get(gcf,'SelectionType'),'alt');
        if adding
            % Regular selection, add label to selected points
            h0 = text(x0, y0, t0, 'VerticalAlignment', 'baseline',
'Tag', 'gname');
            h = [h; h0(:)];
            f = [];
            if (~rectangular), f = find(d <= 1e-5); end
            if (length(f) > 1)
                disp('Multiple observations appear at this point:');
                for j=1:length(f)
                    cj = casenums(f(j));
                    if (cj<0)
                        if iscell(cases)
                            txt = cases{-cj};
                        else
                            txt = cases(-cj,:);
                        end
                        disp(sprintf('    %s',txt));
                    else
                        disp(sprintf('    %d',cj));
                    end
                end
            end
        else
            % Remove label from selected points
            h0 = findobj(gca,'Type','text','Tag','gname');
            hrem = [];
            for k=1:length(x0)
                hrem = [hrem; findall(h0,'flat','Position',[x0(k) y0(k)
0])];
            end
            delete(hrem);
        end
    end
    if (nargin>2), break; end
    [x0,y0,x1,y1] = ginput0(1);
end

h = h(ishandle(h));
set(h,'units',units);
set(gca,'defaulttextunits',units);
set(gcf,'WindowButtonMotionFcn',bmf);
set(gcf,'WindowButtonDownFcn',bdf);

% ----- replacement for ginput/rbbox, gets correct axes
function [x0,y0,x1,y1] = ginput0(n)
[x,y,key] = ginput(1);
if (isempty(x) || isequal(key, 27))
    x0 = [];
    y0 = [];
    x1 = [];
    y1 = [];
    return;
end

a0 = gca;
a = findobj(gcf, 'Type', 'axes');
pt0 = get(a0, 'CurrentPoint'); % point at mouse down, current axes
pts0 = get(a, 'CurrentPoint'); % ditto, all axes
rbbox;

```

```

pt1 = get(a0, 'CurrentPoint');    % point at mouse up
pts1 = get(a, 'CurrentPoint');

% Make sure the current axes are set to the best choice
xlim = get(a0, 'XLim');
ylim = get(a0, 'YLim');
if ( x<xlim(1) || x>xlim(2) || y<ylim(1) || y>ylim(2) ...
    || strcmp(get(a0,'Visible'),'off'))
    % Point is outside current axes, look for better ones
    if (length(a) > 1)
        for j=1:length(a)
            aa = a(j);
            if strcmp(get(aa,'Visible'), 'on')
                xlim = get(aa, 'XLim');
                ylim = get(aa, 'YLim');
                cp = pts0{j};
                xx = cp(1,1);
                yy = cp(1,2);
                if (xx>=xlim(1) && xx<=xlim(2) && yy>=ylim(1) &&
                    yy<=ylim(2))
                    % Update to these axes
                    set(gcf, 'CurrentAxes', aa);
                    a0 = aa;
                    pt0 = cp;
                    pt1 = pts1{j};
                    break;
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

xlim = get(a0, 'XLim');
ylim = get(a0, 'YLim');
x0 = max(xlim(1), min(pt0(1,1), pt1(1,1)));
y0 = max(ylim(1), min(pt0(1,2), pt1(1,2)));
x1 = min(xlim(2), max(pt0(1,1), pt1(1,1)));
y1 = min(ylim(2), max(pt0(1,2), pt1(1,2)));

```